河川流量観測の新時代

水文・水資源学会 研究グループ
「河川流量観測高精度化研究会」編

2010 年 9 月

「河川流量観測の新時代」の発刊にあたって

本論文集のタイトルに「河川流量観測の新時代」と大層な名前を付けた。iPS 細胞を利用した再生医療は新しい医学を創造し、小惑星探査機「はやぶさ」は史上初めて地球外物質を持って帰ってきた可能性があるなど科学の発展はめざましい。このような科学の発展を、例えば家庭用テレビの３D 化などによって直接的に一般市民も享受している。このような他分野の最先端科学と比較すれば、まだまだかもしれないが、年々、新しい河川流量観測の方法が研究されている。それを広く PR したいがためにこのようなこのようなタイトルを付けた。

ご存知のように、河川の流量を測定するためには、特に洪水時には、浮子（ふし）という浮きを利用して流速を測定し、断面を測量する必要がある。何も知らない一般市民にしてみれば、「え！？まだそんなことしているの？」と思うであろう。実際、高校生への大学模擬講義中、この話をしたら驚かれた。しかし、様々な制約条件の下に浮子による流量観測技術が確立されていることは河川技術者であれば当たり前に知っていることである。近年になって、ADCP に代表されるような最新技術によって、これまでに計測できなかったことが可能になりつつあるのが実情である。

“河川流量”という値は、各河川流域における河川計画や水資源計画の核となる数字である。にもかかわらず、「困難だから」という理由で、「浮子による流量観測」で技術開発がストップしてしまってはいないだろうか。”できる”技術に甘んじて、”やらなければならない”技術・研究開発を怠っていないだろうか。そのような疑問から本研究グループは活動している。もちろん、様々な機関や研究者・技術者が、新しい河川流量観測技術を研究・提案している。本書は、現在どのような研究開発が行われているのかを研究者のみならず実務者にも広く周知するために刊行するものである。

本書の刊行にあたって、執筆者には次のようなお願いをした。完成された研究・技術はきっとどこか立派な論文集に提出されているので、本書には、研究・開発過程における失敗談やボツネタを書いて欲しいとお願いした。技術の発展には”失敗”研究さえも広く公開することが必要だと考えた。また、観測や測定に使用した機材や備品の品名や製造会社、必要な人員等の詳細も記載して欲しいとお願いした。なぜなら、立派な論文集の研究論文においても、「本当に何を使って、どうやって観測したの？」と観測自体がブラックボックスになっていることがある。さらに、観測手法や観測技術の研究なら良いが、本来は観測結果を研究すべきにもかかわらず、観測することがいつのまにか目的になってしまっていることもある。観測で四苦八苦（混乱）することなく（四苦八苦するのは当たり前なのだが）、測ったデータをちゃんと議論しよう、という気持ちも込めて本書を発刊した。

さらに、モデル研究中心の研究者においても、使用する河川流量データがどうやって観測・計測されたのか、はたまた何かの近似式から得られたものなのか、全く知らない場合がある。河川流量データがまるで本当の真値だと勘違いして、それに合わせるようにモデ

ルパラメータをチューニングしている場合もみうけられる。是非、こういう方々に河川流量観測の現場を良く知ってもらいたい。もちろん、実務者においては、本書からより良い技術を知っていただき、実際の現場に活用していただければ幸いである。新しい技術は使われなければ意味がない。

　予算に制約があったため、出版物は白黒印刷とせざるを得なかった。しかし、下記ウェブサイトに論文をダウンロードできるようにしたので、カラー図についてはここを参照していただきたい。

http://www.pu-toyama.ac.jp/EE/tebakari/newQobs/journal.htm

　本研究会では、来年度に次号を発刊することを決定した。ご執筆いただける方は是非とも本研究会にコンタクトを取っていただければ幸いである。

　最後に、各執筆者におかれましては、大変お忙しい中を原稿料もなくご執筆いただいた。ここに記して深く感謝いたします。

水文・水資源学会 研究グループ
「河川流量観測高精度化研究会」
代表　手計太一

目　　次

CommonMPプロジェクトの進展と今後の河川流量観測の重要性

DEVELOPMENT OF CommonMP PROJECT AND IMPORTANCE OF RIVER DISCHARGE OBSERVATION

山田 正[1]
Tadashi YAMADA

[1]正会員 工博 中央大学教授 理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日1-4-1）

The author first introduces the CommonMP (Common Modeling Platform for water-material circulation analysis) which can run several element models simultaneously to find out the water and material circulation phenomena, and show the importance of advancement of river flow observation technology which depends on analysis precision. In addition, author review recent studies on river discharge observation technology and offer a future direction toward the advancement of river discharge observation technology.

Key Words: *CommonMP Project, River discharge observation technology*

1. はじめに

現在，わが国における水管理・河川管理に係わる検討手法が大きく変わりつつある．国土技術政策総合研究所が中心となって，これまで実現不可能であった複雑な数値シミュレーションをより高度なレベルで実現し，さまざまな水理・水文現象を解析するために複数の要素モデルを同時に稼働させることができる水・物質循環解析ソフトウェアの共通プラットフォーム「CommonMP（Common Modeling Platform for water-material circulation analysis）」の構築が進められている．これにより，これまでに開発されてきた解析エンジン等のソフトウェア資産の利用や新しいモデルの提案・発表等，ソフトウェアに関する様々な情報・意見の交流を実現し，CommonMP による新たな水管理・河川管理に関する提案を参加者が発展させることが可能になる．これらの仕組み作りの一環として，国土交通省都市・地域整備局下水道部，同河川局，同国土技術政策総合研究所，社団法人土木学会，社団法人建設コンサルタンツ協会及び社団法人全国上下水道コンサルタント協会が共同して「CommonMP開発・運営コンソーシアム」を設立し，土木学会からは水工学委員会の下に「水理・水文解析ソフトウェアの共通基盤に関する小委員会」を組織し，CommonMP開発プロジェクトの推進にあたっている．

本稿では，著者が委員を務めるCommonMPプロジェクトの概要を紹介するとともに，解析結果の精度に大きく係わるデータとなる河川流量の観測技術高度化の重要性を示す．さらに，近年の河川流量観測技術の動向について概観し，これらの観測技術の高度化に向けた今後の方向性を示す.

2. CommonMPプロジェクトの概要

(1) 日本の河川データ，水理・水文ソフトウェアおよびモデルの研究開発の現状

わが国における水文水質データベースや河川環境データベース等は，データの一部は河川局で標準化されているものの，企業各社，各河川事務所，地方整備局等の事業主体が独自に整備されており，互換性のないデータがその都度異なる構造でつくられているのが一般的であり，汎用化も進んでいない．また，企業各社の解析ソフトも独自に開発されたものであり，データ構造も独自に決められていることから，同じ流域を計算する場合でもソフトの違いによって複数の構造の異なるデータを準備する必要がある．さらに，水理・水文モデルの研究開発の現状としても，他の研究者や技術者が開発したソフトウェアを試す機会がないことや他のモデルと組み合わせることができないこと，データフォーマットが統一されていないために，データの再利用が難しいこと，河川・流域のデータが利用しにくいこと等から，水理・水

文モデルの研究開発の成果が分散し，共通利用できるデータ整備の遅れ等の課題が生じている．さらに，河川技術者にとっても，ユーザビリティーのよい水理・水文ソフトウェアが非常に少ないことから，自ら水理・水文解析を行う機会が減少している．治水計画の検討に当たって，用いた計算手法や解析ソフトが明らかになっていない等，透明性(アカウンタビリティー)の確保も重要な課題となっている．

(2) CommonMP構築の目的と進捗状況

上記の背景から，本プロジェクトでは，水理・水文モデルだけでなく，それをとりまく流域の物質循環の複雑系を統合的に同期同調して解析できる共通プラットフォームを構築していくことにより，水政策検討のツールとなることを目指している．また，水・物質循環等のモデルの開発環境を提供することにより，これらの研究開発の活性化に寄与するものと考えられる．**図-1**にCommonMPのイメージを示す．これまで異なる仕様で作成された複数のモデルを用いて解析が行われてきたものから，共通利用できるデータ入出力等の機能を汎用化することにより，それらの機能をもつプラットフォームを構築する．このプラットフォーム上で規格化された要素モデルを接続し，解析を実行できるようにする．

CommonMPとは，解析モデルそのものではなく，解析モデル同士や解析モデルとデータや断面諸元等を組み合わせ，容易に解析するためのプラットフォームのことである．要素モデルとなる各解析モデルは，初めからCommonMP仕様で開発されるものの他に，既存の解析モデル（Fortranプログラム等）をCommonMPの仕様に合うようにラッピングすることによって取り扱える要素モデルとしての活用が可能となっている．将来的には，様々な要素モデルが用意されることにより，複合的な物理現象をCommonMP上でシミュレートすることを目指しており，当面は，雨水流出や河道水理を中心とした水理・水文量の解析がCommonMP上で行えることを目標としている．CommonMPそれ自体の著作権者は，国土技術政策総合研究所であるが，CommonMPそのものはオープンソースとして開発され，無償で配布されている(http://framework.nilim.go.jp/)．CommonMP上で動作する要素モデル（解析プログラム）にどのような権利を設定するかは，要素モデルの著作権者の独占的権利であり，CommonMPの著作権者（国土技術政策総合研究所）がそれを規定することはできない．つまり，要素モデルの著作権者は，要素モデルをオープンソースとすることもソースを非公開とすることもできる．なお，国土技術政策総合研究所は，要素モデルの著作権者が，要素モデルとCommonMPを組み合わせたパッケージとして配布することを認める方針で，CommonMPの動作確認のために数種類の要素モデルの準備を始めており，これらの要素モデルはCommonMPと同様にオープンソースとして公開する予定になっている．

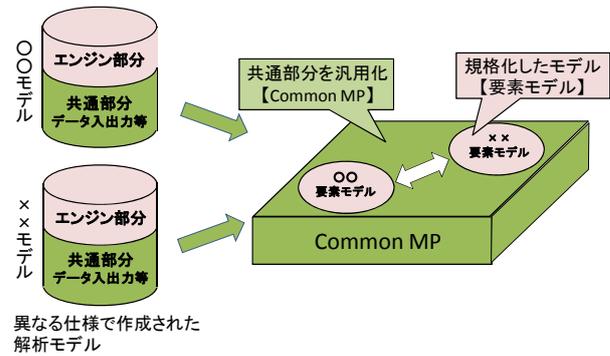



図-1 CommonMPのイメージ

(3) 河川流量計測技術の高度化の重要性

前項までで述べたように，様々な水・物質循環に係わる解析モデルの汎用化および高度化を進めるための仕組みづくりが着々と始まっている．これに併せて，インプットデータとなる降雨やアウトプットデータとなる河川流量の計測精度の向上も進めていくことが重要である．

降雨については，国土交通省が3大都市圏等において，XバンドMPレーダーの設置を進めており，機能を最大限に活用して，局地的な大雨や集中豪雨の予測技術の開発や洪水予測の高度化を行っている．それに対して，河川流量観測については，個々の新しい技術の進展はみられるものの，他に分野と比較すると，進んでいるとは言い難く，洪水中の流れや河床変動を精度よく計測するために，個々の技術成果を結集した戦略的な検討が必要と考える．

3. 近年の国内における河川流量計測技術の動向

(1) 各種流速計測手法の進展

洪水時の河川流量観測には，従来から浮子による手法が用いられてきた[1]．わが国の洪水流特性や水面上に浮遊物が多い状況が考えれば，水面上あるいは水中に設置した機器から流況を計測することは多くの場合困難であり，特殊な観測機器や高度な技術を必要としない浮子測法は有効である．しかしながら，洪水の立ち上がり部やピークの観測に間に合わないこと，植生や橋脚等の河川構造物の影響を受けること，人員確保等の問題点が指摘されている．土木研究所では，これらの課題に対して，平成11年頃から計測機器のセンサ等を水に接することなく，河川の表面流速が計測できる非接触型の流速計測技術の検討を行っている[2]．非接触型の流速計測法は，適用条件が広く，洪水時においても安全に計測ができる点において優れているものの，電波流速計では水表面の1点の流速データのみ，PIV等の画像解析法ではある範囲の表面流速分布の取得にとどまるため，洪水流の内部構造が計測できないという短所がある．近年では，藤田ら

(a) 有人ボートによる計測状況

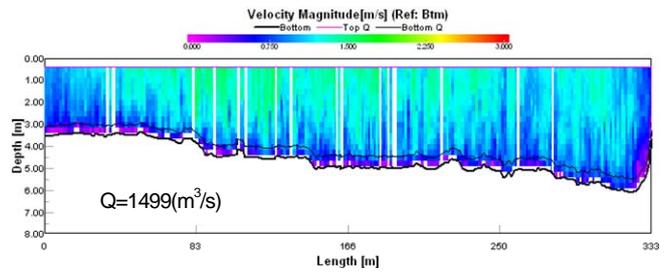
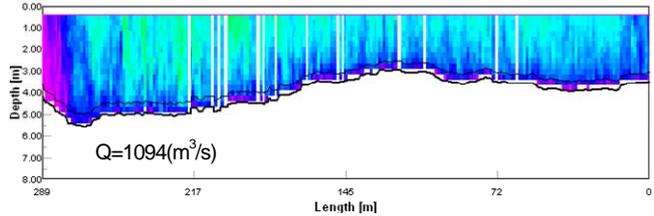
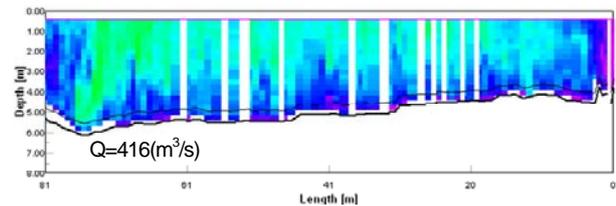
(b) 関宿地点付近の平面図

(c) 利根川 (分流前)

(d) 利根川 (分流後)

(e) 江戸川 (分流後)

図-2 利根川関宿地点における2004年台風23号時のADCP流量観測結果

[3]が従来から提案してきたLSPIV(Large-Scale Particle Image Velocimetry)解析法の適用が困難であった劣悪な条件において，新たなSTIV(Space-Time Particle Image Velocimetry)解析法を提案し，有効性を検証している．

一方，機器を流れに接する形式で計測を行う接触型流速計測法では，近年，各計測層における3成分の流速分布が計測可能なADCP(Acoustic Doppler Current Profiler：超音波ドップラー多層流向流速計，以下ADCPと記す)が有効な観測手法のひとつと認識されるとともに，研究者，実務者を問わず多くの観測事例がみられるようになった．次節では，ADCPを用いた国内における流量観測および推定技術の進展について，同時期の海外の状況と併せて概観する．

(2) ADCPを用いた流量観測技術の進展

ADCPは1981年に米国で開発され，海洋分野を中心に普及した．河川分野への普及は，1995年に小型化が進み，価格が従来の1/2程度になったことが契機となり，米国を中心に世界中で河川流量観測に用いられるようになった．現在，ADCP等を用いた流量観測は，固定観測と移動(曳航)観測に大きく分けられるが，以下では横断面内の流速分布と水深を計測して流量を算出する移動観測について示す．

日本国内においては，ADCPを用いた洪水流観測は，木下[4]がラジコンボートに搭載して先駆的に行っており，土木研究所においても1998年頃からラジコンボートを用いた流量観測システムの開発に取り組んでおり，阿賀野川で$1500m^3/s$級の洪水流観測に成功している[5]．その時期の河川流量観測では，現在のものと比較して空間解像度が低く(計測層厚が大きく)，河床付近と水面付近の計測ができない不感帯が大きかったことから，河川でも主に水深の大きい区間を対象に使用されており，浅水域における観測事例は多くない．また，観測は有人ボートかラジコンボートで行うのが一般的であったことから，規模の大きい出水を計測した事例はない．2001年にADCPの計測機能が向上し，浅水域でも十分に活用できるような高解像度計測が可能となり，翌年2002年には高速流計測を対象とした計測モードが開発されたことによって，日本国内の河川流況特性にも十分に対応できるような機器性能となった．2003年には，橋上から安全にかつ確実にデータを取得するためのADCPを搭載する船艇を開発するために，USGSのMichaelら[6]は，モノハル(単胴船)，カタマラン(双胴船)，トリマラン(三胴船)の船体構造の異なる計8種類の橋上操作艇を試作し，種々の流速場(0.6～3.6m/s)における安定性と引張抵抗を調べ，トリマラン型の船艇が最も適していることを示した．この結果に基づいて開発された橋上操作艇によって，ラジコンボートのような機器や特殊な操作技能を持たなくても計測が可能となり，ADCPを用いた流量観測がより一般的なものとなった．さらに，同年には，日本国内初となるリアルタイムH-ADCP観測システムが鶴見川に設置され，この時期がADCPを用いた河川流量観測技術の大きな転換期

といえる.

著者の研究室においては，2004年の台風23号襲来時に利根川・江戸川分派地点の関宿において，有人ボートによるADCP流量観測を行っている．ハイドログラフ下降期の低水路満杯流程度の状況で，**図−2**に示すように分派地点の上下流において，30分程度の間に3つの断面の流量観測を行った．利根川本川の低水路幅が約300m，江戸川の分派後の川幅が約100mであった．その結果，分派前の流量1499m^3/sに対して，分派後の流量の合計が1510m^3/sとなり，複数回計測を行っても同様な結果が得られた．このことから，ADCPによる流量観測の有効性を認識するとともに，今後の流量観測技術の発展性を確信した.

一方，その時期に米国USGSのOSW(Office of Surface Water) では，ADCPによる洪水流量観測法およびデータの取り扱いに関して，品質管理上の明確なガイドライン[7]を設定している．これによると，各断面において最低4回(2往復)の断面流量計測を行い，4回の計測データに5%以上の誤差がある場合にはさらに4回の再計測を行って計8回分の流量データを平均した値を実測流量として認めるとしている．条件としては，非常にシンプルで基準となっているが，流量値算出までのプロセスについて，ADCPの計測設定条件や計測方法の違いによる誤差評価を詳細に検証しており，実務者向けの計測技術，データ処理に関する多くの講習会を開催する等，一般化に向けた技術の共有が十分なされている.

日本国内においては，これまで流量観測データの精度評価や精度管理に関する議論は，ほとんどなされておらず，ADCPで計測したデータを統一的に評価する手法もなかったため，誰が計測しても同程度の精度を有していると誤った認識がなされていた．しかしながら，2008年に岡田ら[8]が提案した従来のADCPの固定計測における計測精度を空間的に拡張した指標で表わされる偏差流速比および偏差流量比の考え方を用いることにより，計測設定条件やデータの取得状況から精度評価が可能となった．また，ADCPの精度検証事例としては，木下[9]がいち早く平水時において実施しており，土木研究所の長大検定水路においてADCPのウォーターピング(流速分布を計測するために発射する超音波)の検定，さらに新潟東港において，流出入量の全くない条件でウォーターピングと対地速度を計測するボトムピングから得られる計測値を比較し，4往復8回の計測において，ミリメートル単位の流速差であったことを示している．実河川の流水に対するADCPの精度検証事例としては，島田[10]らは石狩川の平水時において，ADCPを搭載したラジコンボートによる移動観測と設置型ADCPの比較を行って，ピング数(超音波の発射回数)とボートの走行速度の違いによる両者の相対誤差の関係を調べている．また，二瓶ら[11]は江戸川の小規模出水時(350〜570m^3/s程度)において，ADCPの移動観測と定点固定観測で得られた流量を比較し，相対誤差が1.6〜7.8%であったことから，ADCPの移動観測精度が高いことを示している．しかしながら，我が国において観測対象となる中規模出水以上の洪水流は，毎秒3mを超える高流速であるとともに，水面が大きく波立つような流況であり，既往の平水時や小規模出水時における精度検証結果をそのまま適用できるとは考え難い．木下[9]は上記の静止水における精度検定の結果が洪水のように激しい流動水に適用して真値が得られているのかという他者からの指摘に対して，検定は静止水，実際の使用は流動水であり，それを疑うことは当時のわが国の検定全てを疑うことになり，絶対流量値を正しく把握できるのは流量がゼロの場合のみであると考え，指摘には顧慮せず現地観測を行ったとしている．しかし，橘田ら[12]は四万十川において平水時と洪水時の計測結果の比較から，ADCPを搭載したボートの揺動が水深や流速分布の計測精度を低下させる可能性があることを示している．その根拠として，ADCP観測では一般にボートの傾斜角補正を行っていないこと，ADCPに内蔵されている傾斜センサーが液面検知式であり，揺動周期が短く振幅が大きい場合に追従できていない可能性があることを挙げている.

この課題については，2009年に行われた岡田ら[13]の詳細な検討によって大きく進展した．高速流で，かつ水面を大きく変動する流況場の計測を想定し，大型水槽(25m×25m×5m)において，ADCP搭載ボートに高精度のMEMS傾斜センサーを設置して種々の周期で揺動させる実験を行い，ADCPの傾斜角および水深に関する計測特性を調べた．つぎに，利根川平成大橋下流の高流速部において，ボートに水槽実験と同様な計測システムとRTK-GPSを搭載した流況計測を行い，ボートの揺動が流速計測値に及ぼす影響を明らかにした．その結果，ADCP内蔵の傾斜センサーは，計測特性としてMEMSセンサーに比べて揺動周期が短い場合に，値を過小に出力する傾向があることが明らかとなったが，それが流量換算値に及ぼす影響は15度傾斜しても5%以下であったことから，計測ボートの揺動が与える影響は大きくないことを明らかにした．さらに，計測ボートの傾斜角が15度を超えると，欠測が多くなることから，精度向上のためには揺動を抑える船艇が重要となることを示した．その結果を踏まえて，萬矢ら[14]は，4台の形状の異なる橋上操作艇にADCP，RTK-GPSおよびMEMS傾斜センサーを搭載して流況観測を行い，安全性および計測精度向上の観点から洪水流計測に適した船艇構造について提案している．以上のように，ADCPを用いて直接的に横断面内の流量を計測する移動観測手法はこの技術レベルまで進歩している.

(3) H-ADCP，超音波伝搬時間差式流速計等を用いた流量算出技術の現状

2005年以降，日本国内でもH-ADCP[15]や超音波伝播

時間差式流速計を用いた洪水観測事例がみられるようになった．H-ADCPはある設置高さの横断流速分布のみ，超音波伝播時間差式流速計は断面平均流速のみの計測となるものの，常時観測や無人観測が可能であるという利点を生かし，ADCPの移動観測結果をキャリブレーションデータとして，二瓶ら[16]や中川ら[17]よって数値解析と組み合わせた流量推定手法が提案されている．また，近年では，川西ら[18]が音響トモグラフィーを用いた横断面平均流速の計側手法を提案しており，広幅感潮河川の太田川において平水時の連続観測を行っている．洪水流観測の事例はまだないが，今後の成果が期待される．

(4) 河川流量プラスアルファの計測技術

ADCP等の超音波を用いた計測機器では，水中に放射された超音波が1)音波の拡散による減衰，2)水自体による吸収，3)懸濁物質による減衰，4)河床による散乱といった物理的な過程を経て伝搬する特性を利用して，水中の濁度分布の推定手法が検討されている．

橘田ら[19]は，超音波の水温・塩分による吸収，濁質の平均粒径による吸収とレイリー散乱特性，ADCPのトランスデューサーが持つ温度特性など多くの補正項を用いてADCPで得られたABT(Acoustic Backscattering Turbidity)と実測濁度との比較検証を行っている．その結果，濁度1～250の範囲で良好な結果を得ている．また，萬矢ら[20]は実験水路において，ADCPで計測された流速分布から摩擦速度と掃流砂量の算定する手法を検討している．また，萬矢ら[21]は,富士川において大規模なRTK-GPS，ADCPを搭載した橋上操作艇による流況計測とポータブル電波式流速計による表面流速観測に加えて，H鋼にセットした音響測深器による河床高自動計測を試みている．この手法が確立すれば，洪水中の流況と局所的な河床変動が同時に計測でき，この結果は土砂水理学の分野に新しい知見を与える可能性がある．

4．おわりに
～今後の流量観測技術の高度化に向けて～

河川の洪水流量観測技術およびそれらの結果を用いた応用技術はこの10年間で大きな進展をみせている．

洪水時における流量や土砂動態観測が今後無人化・自動化の方向に進むとすれば，移動観測による詳細なADCP断面流量をキャリブレーションデータとして，非接触型流速計，H-ADCP等の流速分布が計測できる手法と測深器による河床形状の連続計測を組み合わせて観測を行い，未計測部は数値解析によって推定する手法に移行していくものと考えられる．今後これらの計測技術について研究者をはじめ，実務者のレベルまで広めていくためには，各計測手法の適用条件および誤差を含む計測精度の範囲を明確にすることが重要になる．これにはCommonMPプロジェクトと同様な国レベルの取り組みが必要である．例えば，各種の流速・流量観測手法を同じサイトで同時に使用して検討された事例は少ないため，国土交通省等が既存の手法や最新の計測技術を有する研究者や実務者を集め，同じサイトで合同観測を実施し，各手法の適用範囲や相対的な計測精度について検討する機会を設定することを要望する．また，計測したデータの品質保証や管理についてADCPを例とすると，観測を行う際の計測モードや計測層厚等の設定条件は，現地の流況に応じて観測者の経験に基づいて設定されており，その時点で計測精度に差が生じることがあった．しかし，最新機種には，一般的な計測条件であれば，現場の経験がなくても計測条件を自動で設定する機能が搭載されており，経験の有無に関わらず，同様な精度で計測できるようになっている．したがって，わが国特有の河道特性や洪水流特性に適した計測手法，データ整理，精度評価等の一連の作業について，USGSが実務者向けに定期的に開催するような観測やデータ処理に係わる講習会等が行われれば，データの品質(精度)管理も十分可能である．これらの基礎となる計測技術，データ処理技術および精度評価技術の基礎は，ほぼ確立してきたと言えることから，今後のさらなる研究成果に期待するとともに，これらの成果を十分に生かせる仕組みづくりの進展を併せて期待したい．

参考文献

1) 日本河川協会編：改訂新版河川砂防技術基準(案)同解説 調査編，pp.33-59，1997.
2) 大手方如，深見和彦：非接触型流速計を用いた流量計の開発と実用化，土木技術60巻3号，pp.79-85，2005.
3) 藤田一郎，安藤敬済，堤志帆，岡部健士：STIVによる劣悪な撮影条件での河川洪水流計測，土木学会水工学論文集，53巻，pp. 1003-1008，2009.
4) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案，水文・水資源学会誌，Vol.11, No.5, pp.460-471, 1998.
5) 松浦達郎，金木誠，吉谷純一：ラジコンボートを用いたADCPによる流量観測システムの開発，土木技術資料，Vol.42 ，No.9，pp.22-27，2000.
6) Michael S. Rehmel, James A. Stewart and Scott E. Morlock : Tethered Acoustic Doppler Current Profiler Platforms for Measuring Streamflow, USGS Open-File Report 03-237, 2003.
7) Kevin A. Oberg, Scott E. Morlock and William S. Caldwell: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurement Using Acoustic Doppler Current Profilers, U. S. Geological Survey, Scientific Investigation Report 2005-5183
8) 岡田将治，橘田隆史，森本精郎，増田稔：ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測，土木学会水工学論文集，第52巻，2008.
9) 木下良作：ADCP(超音波流速計)による流量と流れの構造について，第4回河川環境管理財団研究発表会講演録，2006.
10) 島田友典，渡邊康玄：ADCPを搭載したラジコンボートによる流水中の流速測定精度，土木学会第62回年次学術講演

概要集，II-106，2007.

11) 色川有，二瓶泰雄，北山秀飛：ADCPによる流量計測精度の基礎的検証，土木学会第61回年次学術講演概要集，II-219，2006.

12) 橘田隆史，岡田将治，新井励，下田力，出口恭：ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察，土木学会 河川技術論文集第14巻，2008.

13) 岡田将治，萬矢敦啓，橘田隆史： ADCP搭載ボートの観測時の揺動が流速分布および水深計測値に及ぼす影響，土木学会水工学論文集，第54巻，2010.

14) 萬矢敦啓，岡田将治，橘田隆史，菅野裕也，深見和彦：高速流におけるADCP観測のための橋上操作艇に関する提案，土木学会 河川技術論文集第16巻，2010.

15) 岡田将治，森彰彦，海野修司，昆敏之，山田正：鶴見川感潮域におけるH-ADCPを用いた流量観測，土木学会河川技術論文集，第11巻，pp.243-248，2005.

16) 二瓶泰雄，木水啓：H-ADCP観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築，土木学会論文集B，Vol.64，No.4，pp. 295-310，2007.

17) 中川一，小野正人，小田将広，西島真也：横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発と大河川での実地検証，土木学会水工学論文集，第50巻，pp.709-714，2006.

18) 川西澄，渡辺聡，金子新，阿部徹：次世代超音波流速計による感潮河川流量の長期連続モニタリング，土木学会河川技術論文集，第15巻，pp.489-494，2009.

19) 橘田隆史，岡田将治，新井励，下田力，熊田康邦：ADCPを用いた河川流況計測法における課題と国内外における応用観測事例，土木学会 河川技術論文集第12巻，2006.

20) 萬矢敦啓，岡田将治，江島敬三，菅野裕也，深見和彦：ADCPを用いた摩擦速度と掃流砂量の算定方法，土木学会水工学論文集，第54巻，2010.

21) 萬矢敦啓，菅野裕也，深見和彦，葭澤広好，宮本孝行：流量観測高度化に関する富士川南部観測における取組，，土木技術資料，Vol.52 ，No.3，pp.40-43，2010.

（2010.7.20受付）

水文観測の現況と展望

PRESENT STATUS AND PROSPECTIVES OF HYDROMETRY

中尾忠彦[1]

[1]正会員　工博　(財)河川情報センター（〒102-7484 東京都千代田区麹町１－３ニッセイ半蔵門ビル）

The River Administrators, *i*.e. Minister of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, and Prefecture Governors, are running hydrological observation networks covering whole Japan. Present status of the observation networks is reviewed here concerning the posting of stations, data processing, and dissemination to the public. The author proposes future development of the system in view of water resources management in the age of climate change.

Key Words : *Hydrometry, Hydrology, Discharge, Precipitation, Water stage, Database, Internet, Climate change*

１．はじめに

日本において、定常業務としての水文観測は、主として河川管理者によって、河川管理の一環として行われている。本論では、その現状を紹介し、今後のあり方について考察する。意見にわたる部分は筆者の私見である。

２．水文観測の現況

雨量・水位・流量・水質の観測を主として現況を見る。国土交通省「川の防災情報[1)]」として公開されている観測所を表－１に示す。水文観測が、多数の主体によって行われていることがわかる。このほかにも電力会社は水力調査として水文観測を行っているが、川の防災情報にはほとんど入っていない。

表－１のうち、国土交通省河川局の行っている雨量・水位・流量・水質の観測結果は水文水質データベース[2)]として、河川局から公開されている。気象庁の行っている雨量は同様に気象庁のサイトで公開されている。

（１）雨量観測の状況

表－１から、雨量については気象庁よりも河川管理者である国・県のほうが観測所数が多いことがわかる。国だけでも約2,300箇所余あり、気象庁アメダスの1,300箇所弱よりも多い。都道府県の観測所数は近年増加したもので、各県の土木事務所など、河川管理を行っている組織が行っている。河川管理者はその管理する河川の集水域内の降雨量に関心があるので、河川局の観測所のほとんどは一級水系の流域内にある。全国の一級水系１０９の流域面積は合わせて240,117平方キロメートルであるから、１観測所あたり約１０２平方キロメートルとなる。一方、気象庁の観測所は全国土ほぼ均等に配置されているとすると、１観測所あたり２９０平方キロメートルとなる。都道府県の観測所について国土面積との関係を考えると、１観測所あたり約８２平方キロメートルとなる。国土調査法水基本調査作業規程準則[3)]によれば、５０ないし１００平方キロメートルに１箇所の雨量計を配置することとされている。気象庁と国・県の河川管理用の観測所を合わせると、国土調査法の規定を十分満たしていることになる。

ただし、後述するように、都道府県の観測値はほとんどデータベースとして公開されていない。各種解析に用いることのできるのは河川局と気象庁の合わせて約

表－１「川の防災情報」データの種目別所管別観測所数

2010年3月31日現在

	河川局	道路局	気象庁	都道府県	水資源機構等	計
Cバンドレーダ	26		20			46
地上雨量計	2,348	1,182	1,275	4,557	243	9,605
水位計	2,132			4,042	88	6,262
他	1,560	188	87	400	337	2,572
計	6,066	1,370	1,382	8,999	668	18,485

表－２雨量観測所の標高別配置比率 ％

標高m	国河川	気象庁	国土面積
0-100	26	47	28
100-300	28	22	26
300-1000	39	25	38
1000-	7	6	8

3,600箇所で、1箇所当たり約１０４平方キロメートルとなり、国土調査法の基準に平均では及ばないが、１級水系の流域では基準を満たす。

河川局と気象庁の雨量観測所について、標高別に分布をまとめた結果を表－２に示す。標高別の国土面積の比率もあわせて示したが、河川局の観測所の標高別分布は国土面積のそれとよく合っている。河川の水管理としては、標高が高いほど降水量が大きいとされることからも、標高の高い、いわゆる水源地での観測値が必要であるが、その必要に合わせた観測がされている。

（２）水位観測の状況

水位観測は河川管理、及び発電にかかわる組織等によって行われているが、発電関係のデータは表－１に見るように、川の防災情報を通しては、ほとんど公開されていない。

河川局の水位観測所は必ずしも大臣管理区間に設置されているのではないが、便宜上大臣管理区間に設置されているものとして概算すると、河川延長10,513／2,132＝５キロメートルに１箇所の観測が行われている。都道府県の場合、約30キロメートルに１箇所となる。大臣管理区間ではより高い密度で観測が行われていることがわかる。

河川局の水位観測は、一級水系の本川と主要な支川において洪水予報を含む水管理を行うために設置されているが、水系の水文・水理をおおむね把握できるようになっていると言えよう。ただし、二級河川はもちろん、一級水系の中でも比較的小規模な氾濫区域や、内水区域については都道府県の観測所が不可欠である。

（３）流量観測の状況

平成７年の調べによると、河川局による流量観測は全国約1,300箇所で行われている。都道府県によるものは800箇所程度である。

（４）水質観測の状況

河川局は水文水質データベースによると1,375箇所で水質・底質観測を行っている。水質観測は常時監視装置によるものと、手分析によるものとがある。分析項目数は観測所によって異なる。

（５）レーダ観測の状況

河川局と道路局は２６基のＣバンドレーダを運用している。データは地上雨量計によってキャリブレーションされ、レーダの特性を実地に調査して定められた合成マップに従って合成される。河川局のサイトから「レーダ雨量計情報」として公開・提供されている。2001年の省庁再編後、国土交通省防災情報提供センター[4)]のサイトが設けられ、気象庁のアメダス合成レーダと合成されたプロダクトも提供されている。

2010年７月から、Ｘバンドマルチパラメータレーダの試験運用が始まり、一般にも公開されている[5)]。コンソーシアムに参加する研究者（組織）にはＸバンドＭＰレーダから得られる多様なプロダクトがオンライン・リアルタイムで提供される。

３．水文データの品質管理

以下では、河川局が設置・運用している雨量・水位観測のデータを中心に述べる。

河川局の行う水文観測は、国土交通事務次官の定める「水文観測業務規程[6)]」に従って行われている。現行の規程は、平成１４年４月に改定されたものである。規程によれば、水文観測の責任は地方整備局長等（北海道では北海道開発局建設部長、沖縄では省が異なるが河川局所管の観測について沖縄総合事務局長が責任者となっている。以下、特に断わらない。）が負っている。観測の実務は河川事務所長等の責任とされている。地方整備局長等は、毎年データを照査したうえでデータベースの形で公開することとされている。

（１）観測データの登録

テレメータ観測されたデータはテレメータから直接にデータ管理用の水系別データベースに入力される。また、自記紙から読み取られた値も、流量観測された値もそれぞれ入力される。入力後に、定期点検などで自記紙やテレメータで伝送された値と、水位標の読み値とが異なっていることがわかったようなときには機器補正が行われる。機器補正の後、データ照査が行われる。

（２）標準照査と高度照査

データの照査は事務所段階で行われる標準照査と、整備局段階で行われる高度照査と、二段階の手順を踏んで行われる。標準照査では単一のデータ系列について照査し、高度照査ではより広い範囲で複数のデータ系列の相互比較によって照査している。標準照査と高度照査はそれぞれ、既定のアルゴリズムによって疑わしいデータを抽出するＡＱＣ（Automatic Quality Check）と、技術者がデータを見て妥当性を判断するＭＱＣ（Manual

Quality Check)とからなっている。ＡＱＣでは、いろいろな角度からデータを全数チェックしているが、あくまでも疑わしいデータを抽出しようとするものであって、ＡＱＣのある種目で所定のしきい値を越えたからといって直ちに異常値とするのではない。すべてのデータを技術者が見るのは困難であるので、ＭＱＣの前処理を行うという位置づけである。

高度照査のＡＱＣで抽出されたデータは、ＭＱＣで「欠測」、「推定値」、「正常値」と判定される。欠測は文字通り欠測した場合と、データがあっても正常値とは見なされず、しかも正しい値を推定することができない場合にそのように判定される。元のデータが異常であったり、欠測であったりしても正しい値を推定することができる場合には推定値として値を入れる。疑わしい点があっても、間違っているという確実な裏付けが無い場合には正常値とする。

水位が急に上昇した後急低下する、スパイクデータは、上流や下流に堰があって開閉されたときや、局地的な降雨で生ずることがある。データ照査の対象としている１時間間隔の値ではわからないことがあるが、１０分間隔のデータや近隣の雨量観測値、レーダ観測値、上下流の水位計の変動を調べる。現地調査を行うこともある。急上昇・急低下の現象は起きなかったと推定されれば欠測とする。水位の場合、時間的・空間的な連続性があるので１箇所だけの急上昇・急低下が無かったことまでは推定できるが、その時刻の値は推定できないという考えからである。集水面積におおよそ対応して短時間の変動がある範囲におさまるという連続性があるので、時系列で当該データを解析するときに、たとえば直線補間して用いれば、結果に影響することはまずないと考えられるが、正しい観測値が得られなかったことを明示するために欠測としているわけである。

雨量の場合、「青天の霹靂」ということがある。疑わしい観測値が検出されたときには、近隣の降雨やレーダ観測値、下流の水位変動、天気図、新聞記事や雨量計周辺の人からの情報を集めて判断する。雨が降ったはずがないと判断されるときには推定値として０（ゼロ）を入れる。降ったと判断されるときには観測されたデータをできるだけ生かすため、観測値をそのまま正常値としている。

（３）地方整備局水文観測検討会の審議

高度照査のＡＱＣで抽出されたすべてのデータについて、それについてどのようにＭＱＣを行ったかをとりまとめて地方整備局の単位で設けられている水文観測検討会（名称は地方によって異なる。）に報告され、欠測値・推定値・正常値の判断の妥当性が審議される。検討会によって、再調査が指示されることもある。検討会で承認されたデータは照査済みデータとして、水文水質データベースに登録され、公開される。

４．水文水質データベース

水文観測業務規程では、データの公開をデータベースとして行うよう定めている。現在は「水文水質データベース」として公開されている。政府の進める電子国土の方針に従って、河川行政でも「『水に関するあらゆる情報を収集整備し、国民がそれを共有し、活用することによって実現された、安全で多様な文化を持つ国土』を『水情報国土』として定義し、その構築に向けてハード・・・、ソフト・・・整備を進めて」いる[7]。水文水質データベースは、水に関する情報の中心として水情報国土の重要な要素となっている。

（１）データベースへのデータ登録

全国水文水質データベースへのデータ登録は、オンラインとオフラインの両方がある。「川の防災情報」に表示されるオンライン・リアルタイムのデータを伝送・管理している「統一河川情報システム」からオンライン・リアルタイムで入力されたデータは、照査される前の速報データという位置づけであり、画面上では青字で表示される。高度照査を経て、各地方の水文観測検討会等で承認されたデータは、オフラインでファイルから入力され、速報データと置き換えられる。自記紙やデータロガーから読み取って照査されたデータもこのときいっしょに登録される。照査の済んだデータは確定値として、画面上に黒字で表示される。

（２）データの登録状況

全国水文水質データベースに登録されている観測所は2010年７月現在で、水位流量観測所約2,100箇所、雨量観測所約2,600箇所である。川の防災情報と比較して、テレメータ化されていない観測所が追加されている一方、都道府県のデータは入っていない。

（３）データの利用

水文水質データベースからは、対話画面でデータを検索して、表・グラフとして表示させたり、ファイルにダウンロードすることができる。また、水情報国土のデータベースの一環として、水辺の国勢調査データベースと連携して検索する、いわゆる串刺し検索ができる。ウェッブ上のシステムであるので、水文観測業務担当者も通常はこのシステムを利用すれば、不用意に原データを改変してしまう恐れもなく、データの活用ができる。また、河川協会から発行されている雨量年表・流量年表は、事務所等においてデータベースから印刷用の版下を出力する機能が実装されており、書き写しなどの誤りがなく、しかも作業を短縮する手順ができている。

表－３　２００９年８月（台風台９号）による累加雨量上位観測所「川の防災情報」による　単位mm

順位	観測所名	所管	累加雨量
1	塩原ダム	茨城県	321
2	東荒川	国河川	305
3	高百	国河川	286
4	今市（気）	気象庁	285
5	藤原	国砂防	278
5	弓張	茨城県	278
7	湯宮	茨城県	274
8	高林	国河川	273
9	東荒川ダム	茨城県	268
10	霧降	国砂防	257
10	大津港湾	茨城県	257
12	北茨城（気）	気象庁	252

５．水文水質データベースの発展

現在の水文水質データベースには、なお改善すべき点が多くあると感じられる。筆者はその構築と運用に参画してきている立場であり、反省を込めて今後の発展の方向を考えたい。

（１）データの活用

水文水質データベースはそれだけで閉じたシステムではなく、各種の解析のためのデータが容易に取り出せることを目指している。解析のための応用アプリケーションは、データベース管理者が準備するというよりは、個々の解析者なり、ユーザ側に立った人が作成するのが好ましい。それを支援する仕組みとして、現在構築が進められ、Version 1.0.2が発表されている「水・物質循環解析共通基盤（CommonMP）」がある。水情報国土の一環として、河川縦横断測量成果、河川中心線データ、流域ポリゴンデータなどが順次整備されつつある。CommonMP上で流出解析を行う要素モデルから水文水質データベースのデータを呼び出す手続きを、また一つの要素モデルとして開発すれば、研究者・実務者が共通して、リアルタイムあるいはオフラインの解析を行うためのツールとなると期待される。

（２）空間的な拡大

現在のデータベースは河川局水文水質データベースにとどまっている。特に都道府県のデータが入っていないのは不便である。表－３は、2009年８月の台風第９号で累加雨量が250 mmを超えた観測所をまとめたものであるが、都道府県のデータが無くては豪雨の全容がつかめないことがわかる。リアルタイムのデータは公開されているのにデータベースに入っていないのは残念である。

ちなみに、近年の集中豪雨において気象庁は、自治体などの観測データも用いて豪雨の分布などを発表しているようである。データが広く使われることによって密度の高い解析も可能になることが理解されて、データが充実することが期待される。

さらに進んで、都道府県にとどまらず、大学等の機関が行う水文観測のデータも収録し、ひいては少なくともアジアという範囲まではデータ範囲を広げ、世界のデータセンターを目指すべきであると考えている。観測所コードの桁数は十分あるかとか、改修費用の問題はあるが、日本が世界の水問題解決に寄与する事業になり得るものであろう。

（３）時間的な拡大

データ登録を、古いデータまでさかのぼってできるだけ拡大することが望まれる。昭和１３年（1938年）に第１回の流量年表が発刊されということは、その頃から全国を一定の密度で観測する体制ができたのだと推察される。長い歴史を有する流量年表・雨量年表は発行元である河川協会によってデジタル化され、一般に販売されている[8)]。しかし、水文水質データベースに格納されているデータとあわせてシームレスに使うことは、現時点でユーザの努力にゆだねられている。年表は日流量や日雨量を年表にしたものであり、データベースは時間データを基本としているために、接続させるのが面倒ということはあるが、やはりできるだけ長い時系列データでないと、気候変動の影響などは現れてこないと思われる。

（４）迅速な確定値化

水文観測業務規程には、暦年前半のデータは９月頃に、後半のデータは３月までに照査を終えて公開することとされている。観測と公開までのタイムラグは、自記紙の回収が３ヶ月ごとに行われることが多いという事情もある。また、流量については、ある年の流量を求めるには、当該年の前年１０月から当該年の翌年３月まで、１８箇月間に行った流量観測から水位流量曲線を求め、水位から換算するという手続きによっているという事情がある。これは、年ごとに水位流量関係が大きく変化して、水位が変わらないのに流量が大きく変化するという不都合を軽減するための措置である。とは言え、ＩＴの時代であり、観測から照査して公表するまでのタイムラグをさらに短くすることが望まれる。

河川改修計画や利水開発計画を立てるのであれば、多少時間の余裕もあったと思われる。しかし、現在の水文観測は洪水管理・利水管理・環境管理のための情報収集活動である。現況を速やかに認識して、必要な修正をしながら行動を決断しなければならないときに、半年以上も待たなければ確定値にならないというのでは行政への信頼を損ないかねない。

６．水文観測の課題

世界的には気候変動、中国・インドをはじめとする経済発展による資源・エネルギーの逼迫、国内では少子・高齢化の影響が顕在化してくるなど、日本全体が体制の変革を迫られている。この中にあって、水文観測の体制・技術も積極的に対応してゆく必要がある。

（1）観測の継続

第２章で見たように、日本の水文観測は河川管理者の立場から、河川工事の計画を作成するための基礎資料を収集すること、及び洪水予報と利水の管理という目的をもって行われてきている。水環境の維持・改善を図るため、それ自身が国を構成する重要な要素である水の実態を把握するという立場から、品質水準を維持・向上させながら適正な規模で継続することが必要であると思われる。これは、アメリカ合衆国地質調査所（ＵＳＧＳ）の活動と筆者が理解することと一致する。またイギリスにおいてもスコットランドの自主権増大など分権への動きがある一方、水資源管理については流域ごとの管理委員会から、イングランド住宅・都市・農村問題省の外局として単一の環境庁が直営で流量観測を行っている[9)]。

水文観測の行政的側面で活動してきたものとして、近年の地方分権化議論の中で水文観測は今後どのようになるのかに関心を抱いている。筆者としては、水文観測の基本部分は中央政府の業務として継続されるべきであると考えている。ある州は水文観測を行い、ある州は行わないというのではまずいと思うからである。

財政難を理由に、それぞれの方面で不可欠と考えられてきた事業も廃止・縮小が議論されている中で、水文観測が国民の理解を得るためには、国民に対する説明が必要であり、そのためには「役に立っている」と認識してもらえるような業務展開が必要であろう。

（2）流量観測における新技術の開発と採用

国土交通省の河川流量観測は、河川計画の策定や洪水予報のために行われ、その成果は流量年表として公刊され、水文水質データベースとしてウェッブサイトが開設されて、日本のインフラストラクチャーの一つとなっている。

しかし、その技術は筆者が1969年に当時の建設省に採用された当時とほとんど変わっていない。高水流量観測に際しては、多数の職員がいたこともあって自ら浮子を製作し投下して観測したものであった。材料は丈夫な竹材で、漬け物石にもなるかという重しをつけて何人もで投下していた。浮子について、水深5.2mを超えるときには吃水長4mの浮子を使うとの指定があるが、現在これを守るのは至難である。現在使われている浮子は工場で生産され、均質性という観点からは優れている。しかし、その長さは運搬の便宜などから2mまでとなっており、4mの浮子にするには２本継ぐこととなるが、継ぎ目はどうしても弱点となりがちである。浮子を現場で製作していた時代には、「増水時には水流の乱れが激しいので重りを２倍つける」といった工夫もされていたという。それほどに激しい水流に耐えうるか、心許なく感じる。

ある範囲の水深に対して一定の規格の浮子を用い、それに対して所定の更正係数を乗ずるというのが現行方式で、簡明さという点で利点がある。現地において観測が終わると直ちに流量値が概算され、速報することができる。しかし、WMOのGuide to Hydrological Practiceでも[10)]、オランダの教科書[11)]でも更正係数に相当するものは吃水／水深比で定めており、水理学的にはこの方が説明しやすいと思われる。洪水流量は洪水終了後に横断面測量などを行って計算しなおして正式の値になるもので、その際には多少複雑な式を用いても特段に負担とはならないと思われる。

現行の「水文観測[12)]」においても、「浮子の更正係数は種々な条件で決まるものであり、且つ、その条件の中には現状では観測や解析が不可能に近いものがある。従って本書では将来の研究によってこれらの事情の明らかになるまで、一応簡易なものとして更正係数を定め、流量にあまり大きな影響を及ぼさぬ範囲で実用性を増すこととした。」と解説している。新たな技術開発が行われたときなどに見直しを行うべきものである。

「観測や解析が不可能に近」かった現象を観測できる新技術として、ＡＤＣＰがある。現地河川における三次元的な流速分布が短時間に測定できるようになった。しかし、ＡＤＣＰは水中にセンサーを浸す必要がある、いわゆる接触型の観測法である。日本の急流河川の洪水では流速が大きくなり、波立って流れるなど、ＡＤＣＰによる観測が不適当であったり、手法によっては生命の危険さえともなったりすることがある。また低水時の流量観測においては、ある程度の水深がないと測定できないという問題もある。

新技術が紹介されると、種々の難点が挙げられて、「だから使えない。時期尚早である。」との結論が出されることもある。そのような論点について木下良作と筆者[13)]が考察している。筆者は、全ての流量観測をＡＤＣＰで行うべきであるとの主張をしているのではなく、条件に応じて最善の手法を用いるべきであると述べているわけである。たとえば以下の手法が考えられる。

・ＡＤＣＰを用いた更正係数の決定

危険を感じない段階までＡＤＣＰと電波流速計、さらには浮子流量観測を併用して、電波流速計や浮子の更正係数をＡＤＣＰと比較して定める。より高い水位にはそうして求めた更正係数を外挿して用いることも考えられる。

・主要地点で高精度の観測

流域の主要地点ではできるだけＡＤＣＰを用いて観測して、流域としての流出量を高い精度で押さえる。

・水理計算とも比較

流域の主要地点においては、水理計算とも比較する。近年は河道の計算法も進んできている[14)]。堤防法線が滑らかでない場合など、法線と洪水流の流向とのかい離によって逆流が起きるという現象も再現されている。全ての観測にこれを用いる必要はないかもしれないが、重要地点においては現地観測と計算実験、さらには模型実験も併用して精度の高い流量ハイドログラフを求める。上流や支川の流量観測値がこのハイドログラフと大きな矛盾がないかどうか検討する。

（３）洪水流量観測の精度向上

年間流出量とその変動特性は、水資源問題を考えるときに最も基礎的な特性である。年間流出量のうち、洪水流量は低水時に比べて桁違いに大きいので継続時間は短いとしても総量としてはかなりの部分を占める。変動特性も、低水時の変動の絶対値は小さいので、洪水時の値が重要である。総量と変動いずれにおいても洪水流出の占める部分が大きいので、洪水流出を特に精密に調べる必要があるわけである。

洪水ハイドログラフの解析は、洪水予測など洪水管理についても、水資源管理についても重要であり、重要地点について複数の手法を用いて解析することが望ましい。

（４）気候変動の時代における水文観測

毎年世界中で、日本国内で見ても洪水・渇水の被害が生じている。これが気候変動の表れであるか否かにかかわらず、目の前の問題として解決を迫られている。そして、今日その対策を取ることは、１００年後に気温が２℃あるいはそれ以上上昇しても、または少しも上昇していなくても、無駄になることもないし、逆効果を生むものではないと考えられる。水の分野で対策をとるためには、まず水文観測をきちんと行わなければならない。精度の高い観測を継続して進めることによって、洪水に対しては水防活動・避難行動を的確に行うことができ、渇水の場合にも冷静に対処することができる。

（５）国際基準との調和

日本には国際河川がないので、水位・流量の観測などは国内で一応完結するようにも見える。しかし、二酸化炭素排出量の削減など、国際的な対応があることを考えると、水文観測も国際的な基準を念頭に置いて行うべきであろう。国際基準としてはWMOのGuideのほか、国際標準化機構（ISO）もさらに詳細な基準を定めている。日本ではほとんどの洪水がフラッシュフラッドであり、国際基準を直接に適用することは不適当な場合がある。流量観測を行っている間に流量が変化してしまうので、多少不確定さが増すとしても作業を手早くする必要があるなどである。そういう事情をきちんと認識しておくべきだと思うわけである。

国際化としては、外国に合わせる、対応するというアプローチだけでなく、日本の基準を外国に紹介し、国際基準にしてゆくということも、これまで多大の河川事業を実施してきた国として、一種の責任であろう。たとえば土木学会水工学委員会ISO/TC 113国内検討委員会では、水文データ伝送に関する基準を日本国内での経験を取り入れて提案し、技術基準（TS、国際基準（IS）の次のランクの基準）に採択された。2000年１月に話が始まってから2007年５月にTSが正式に発行されるまで長期間にわたったが、国際化といってもそういう地味な活動から始めなければならないであろう。

７．結論

水文観測は至って地味な業務であるが、水環境を良好に管理するために不可欠である。新旧の課題が多く残っているが、着実に技術開発を進め、実施体制を構築することによって解決してゆく必要がある。

参考文献

1) 川の防災情報：http://www.river.go.jp/
2) 水文水質データベース：http://www1.river.go.jp/.
3) 国土調査法水基本調査作業規程準則：http://law.e-gov.go.jp/
4) 国土交通省防災情報提供センター：
http://www.jma.go.jp/jp/bosaijoho/radar.html
5) XバンドMPレーダ雨量情報:
http://www.river.go.jp/xbandradar/
6) 水文観測業務規程：http://www1.river.go.jp/
7) 水情報国土：http://www5.river.go.jp/
8) 雨量・流量年表データベース(DVD)：(社)河川協会, 2007
9) 中尾忠彦：イギリスの河川管理、河川、2008年5月号
10) World Meteorological Organization: Guide to Hydrological Practices, ver.5, 1994.
11) W. Boiten: Hydrometry, 2000.
12) 土木研究所編著：水文観測　平成14年版、2002年
13) 木下良作・中尾忠彦：ADCPによる河川流量の測定と河道水理機構の観測、土木学会誌、2007年10月号
14) 杉山・赤木・加藤：栃木県黒川における水面変動を伴う氾濫流動の数値解析、自然災害科学、2010
15) International Standard Organization:
ISO/TS 24155 Hydrometry – hydrometric data transmission systems – Specification of system requirement, 2007

（2010. 7. 20受付）

流量観測の過去と未来

PAST PROGRESS AND FUTURE DEVELOPMENT OF DISCHARGE OBSERVATION

木下　武雄
KINOSITA, TAKEO

正会員　理博　株式会社水文環境代表取締役（〒103-0005　東京都中央区日本橋久松町10番6号）
Member of JSCE, Dr.of Science, JSCE Corp.

Hydrological observation has been intensively carried out for water resources management system in Japan since the modernization era, the late 19 Century. The technical standards were formally promulgated in 1954 for water surveys, especially discharge observation. Hydrometry engineers still stick to the standards for half a century. But many problems were found when the author recently investigated field works and data processing of discharge. It is advised that advanced technology should be introduced to discharge observation to solve the problems, such as a radio velocimetory, an ultrasonic flowmeter, ADCP and of course computers for future development.

Key Words : *Observation, Discharge, Drift Rod, Stage-Discharge Relation, Advanced Technology, Ultrasonic Flowmeter*

１．はじめに

これまで流量とは、○○川の××における流量というように限定された地点でのみ役に立つ情報と考えられて来た。それは勿論、○○川の治水・利水に役立つものであるから、国がその観測に努力してきたのは当然である。さらに全国スケールでみると、こうして判明した水の量は国民の財産であるので、流量を観測することは、財産を明らかにする国の仕事であって、人口統計や国民総生産の調査と並べられる行為である。

水の惑星と言われる地球規模に視野を広げると、○○川の××における流量は地球上を循環する水の動態を知る上での一つのチェックポイントである。特に気候変動の行方を予測するためには欠かすことの出来ないものである。

日本でも明治時代になり、近代化の流れの中で、19世紀から試験的に流量観測を行っていた。発電水力の需要に対応して、1937年の河川統制で流量観測が広まり、1938年分からの流量データが公刊されている。1951年戦後の復興のため、水文データの向上の必要性は内閣総理大臣に報告され、観測に関する諸法、規程などが整備された。しかし問題はそれからで、半世紀にわたって、現在その規程などがあまり変更されないで、そのままであり、その適用についてはレベルが却って落ちているという懸念もある。事実、1951年の内閣総理大臣への報告で欠陥とされた点は今でも欠陥である。新技術の導入でそれを補う努力もなされている。世界は著しく進展している。治水・利水のみならず、気候変動のモニターなど、人類の安定的発展に役立つ流量観測の充実を願ってこの小文をまとめた次第である。

２．河川流量は全球水循環のチェックポイント

全球的水循環過程で、どこにチェックポイントを置くか。海水位は測っても波浪・海流・水温（熱膨脹）、風による吹送などで変動が大きく、チェックポイントになりえない。大気中の水蒸気フラックスを測れるだけの全球ネットワークはない。降水量は国内でさえも、特に冬期降水量について、精度が悪い。水が集まって動いているのは河川しかない。河川の流量は全球水循環の唯一のチェックポイントである。

21世紀はバラ色の世紀ではなく、水問題の世紀になることをユネスコは指摘し、1965年からInternational Hydrological Decade（IHD－国際水文学十年計画）を始めた。今後の水文要素の変動を把握するため日本でも研究所、大学などで活発な活動が展開された。もちろん、流量も重要なキーワードであった。

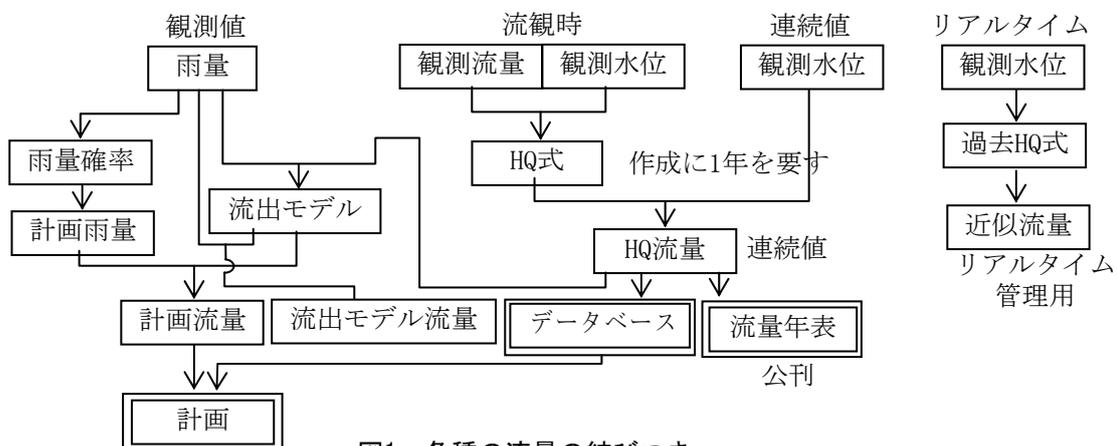
３．各種の流量

河川の流量となった流出は我々の社会に重大な影響を持つ。すなわち多すぎれば洪水となり、少なすぎれば渇水となり、いずれも災害の原因である。広義の水資源の

開発と管理とは洪水の流量、特にピーク流量を減らすか、速く海へ排出すること、つまり洪水防御である。渇水時には、何らかの方法で流量を増やすことである。古くからの言葉として、それらは治水・利水と呼ばれる。国及び自治体は治水・利水について責務を負うことは古今東西同じである。最近は河川環境の保全が加わり、それに住民も参加するように変って来た。

その場合、治水・利水や環境保全の評価の要素には何があるか。その重要な一つに水位流量がある。洪水を防ぐ行為の最終の答は浸水しないように、ということで、水位の問題に帰するが、その水位を決めるのは流量である。水位は折れ尺を壁に貼りつけておいても測れるが、流量は容易には測れない。通常、ある決められた断面で、何回も水位と流量とを測って、その両者の関係式、水位流量曲線式（略してHQ式）を作っておき、そのHQ式を用いて任意の時の水位から流量を求める。水位は自記水位計によって連続的に測れるが、流量は2,3の例を除いて連続的には測れないので、このHQ式が常用される。流量の実測方法については後述するが、河川のリアルタイム管理にも、河川の計画にも、ここで述べた通りのHQ式による流量は使えない。なぜならHQ式を作るには、何回かの流量の観測（流観と略す）によらねばならないので、すぐには作成できないからである。リアルタイム管理には過去（例えば前年）のHQ式を用いて水位から近似値として算出される流量を利用するしかない。河川の計画には、計画の基礎条件の下での流量を用いるので、HQ式による流量そのままは使えない。基礎条件とは、例えば100年に1度の大雨に対する流量というようなことである。雨量の確率分布から100年に1度の雨量を求め、流出モデルに入れて算出した流量で計画高水流量を決める。流出モデル作成には観測流量ではなくHQ流量が用いられる。

色々な流量が現われたが、その基本は観測流量で、上に略述した方法の相互の結びつきは図1の通りである。

４．HQ式作成に係わる注意点

(1) 国土調査法の準則

このように多種の流量があるが、その源は観測流量である。一般に流布されている流量はHQ流量である。その間にHQ式の作成と利用があるわけである。

国土調査法水位及び流量調査作業規程準則（総理府令第75号　昭和29年10月9日）によれば高水流観とは既往10年間で毎日の水位又は流量のうち100回以上に該当する水位又は流量における時におこなうことになっている。同準則に低水流観という表現はないが、高水以外の流観としてあるのを、仮に低水流観とすると、少くとも年間36回以上行うものとする、と決められてある。日本では高水は浮子を流して観測を行い、低水は可搬式流速計によることにしている。外国では可搬式流速計が主で、それが不可能な洪水時には浮子などを用いる。日本では初から方法を2分している。そのため高水流観より低く、低水流観より高い水理状態を中水と呼んでいて、現実としては中水流観は殆んど行われていない。

(2) 最小自乗法のHQ式

HQ式は当該河川の流れが等流であることを前提としている。この前提は重要であるが、忘れられていることが多い。実際上は

$$Q=a(H+b)^2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

と表記する。Q：流量、H：水位、aとb：流観から求まる実験定数である。a,bを最小自乗法で求めるのであるが、実用上は開平して、

$$\sqrt{Q}=\sqrt{a}(H+b) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

において最小自乗法を用いている。式（1）の最小自乗法と、式（2）の最小自乗法とは根本的に異なることには注意しておいてほしい。

式（2）を想定して、縦軸にH，横軸に$\sqrt{Q}$をとって流観値をプロットするとほぼ直線に並ぶ例が多い。

図1　各種の流量の結びつき

流観値の精査にはHV図を用いることをすすめたい。Vとは流量÷断面積で平均流速と呼ばれる。これを一見すると様々な問題が発見できる。学生の演習例題に好例である。

(3) 等流HQ式[1)]

観測水位流量プロット図において、ある実測点からその付近のHQ関係を推定するのに、等流HQ式がある。最小自乗法によるHQ式は、関係するすべての点を利用するが、等流HQ式は、ある実測点において、マニング式とHQ式

マニング式　$Q=(1/n)i^{1/2}AR^{p}$　　$p=2/3$ ··· (3)

HQ式　　$Q=a(H+b)^{2}$ ·················· (4)

において、HとQとの値とその勾配（図上の）とが一致すると仮定することで次の関係になる。

$$a=(Q/A)(1+p)^{2}B^{2}/(4A) \quad \cdots (5)$$

$$H+b=2R/(1+p) \quad \cdots (6)$$

こうして、a，bが求められ、HQ式が作成される。上式でQ：流量、n：粗度係数、i：水面勾配、A：流水断面積、R＝A／B：経深、B：水面幅、H：水位である。粗度係数や、水面勾配は消去される。

これは流観流量一つ一つが持つ妥当性を検討するのに有効である。

(4) 電子計測を信じるな

HQ式作成時に用いる水位は基準断面における量水標（水位標）の水位である。HQ式に代入して流量を求めるための水位は自記水位計による水位である。この相違は一口で解消される。自記水位計目盛は基準（断面）量水標に常に一致させてある筈だから。とは言っても、最近のエレクトロニクスを利用した水位計にはドリフトとスパイクノイズその他の欠点がある。ドリフトとはある時点で基準（断面）量水標に合わしておいても、0点がずれたり、高い水位でズレが生じたりすることである。スパイクノイズとはある時に急に何cm又は何mも異った値を示し、次の時点で元へ戻る場合である。いずれも不適切な電子部品の利用によるもので、適切な部品で組み立てられた水位計を適切な価格で購入すべきである。さらに保守点検を怠ってはならない。水位が適切でないと、HQ式も、それによる流量もバラツクことになる。保守点検が重要である。

(5) 観測高度化への期待

今まで見たように、水位からリアルタイムに連続流量を求めようとすると、過去のHQ式を用いて近似的にしか流量が求められないとか、中水観測は空白とか、年間の観測回数を満たす観測所は少ないとか、年界の断層とかの諸課題があることが、読者にはわかっていただけると思うが、さらに重要な諸課題があり、流量観測は在来の方法に頼らず、高度化が望まれるわけである。

5．流量観測の経緯

ここで在来から行われて来た流観の経緯を一瞥してみる。[2)] 可搬式流速計は1873年にデレーケが日本へ持参したと言われている。流量観測は、はじめて明治24年（1891年）に瀬田川で流量観測が行われたと言う。明治27年（1894年）には九頭竜川でタコメートルを使ったとのことであるが、実態はわからない。浮子を使って石狩川、雄物川など、また九州の河川でも流量観測がなされたようである。

可搬式流速計はプライス流速計が多かったようである。昭和12年（1937年）に河水統制令ができて、流量観測も体系化された。昭和13年（1938年）分より内務省（国土交通省の前身）は流量年表を公刊した。第一回の目次をみると、37水系の111ヶ所の日流量が記載されている。

昭和26年（1951年）9月25日、日本の復興を図る経済安定本部資源調査会は「水文学資料の欠陥に関する報告」[3)] をまとめ、経済安定本部総裁総理大臣 吉田茂に対し報告した。これは資源調査会議長安芸皎一が同会長周東英雄を経て、総理大臣吉田茂に提出したという形になっている。道筋を作っておいて総理大臣にまで水文学資料の欠陥を報告したという手際の良さは抜群であるし、無論、空前絶後である。

これによると、流量及び水位の観測については、流量観測所数は建設省121、資源庁電力局水力課の所掌のもの約500という。水位観測所（水位のみ）数は建設省837、他に都府県が多数という。流量観測の精度について、平水・低水については、上下流で整合しない例をあげ、地下水・伏流水の出入、水位観測の不正確、水位流量曲線の不適確が問題であるとしている。そのため、断面の整った所を観測所とすること、水位流量曲線の精度向上のため精密法の流観を行うこと、他の測定との比較に考慮を払いたいとしている。これらは今なお有用な指摘と言うことができる。

水文学研究上の諸問題として十数項目あげてあるが、その中で、時計の改良、洪水流量測定の精度向上、洪水追跡の実地応用開発、自記水位計の改良、特に縮尺を変えて測る方法、河川流出の因子の分析手法の発展等が指摘されている。これを契機に次々に観測の法律などが整備されて行った。

気象業務法（昭和27年（1952年）６月2日）が公布された。国土調査法第三条第一項の規定に基き、水基本調査作業規程準則（昭和28年（1953年）７月18日総理府令）、水位及び流量調査作業規程準則（昭和29年（1954年）10月9日、総理府令）が出された。これらにより戦

後の水文分野の発展を支える法的体制はできた。

この後、気象庁では地上気象観測法（後に指針）、建設省では河川砂防技術基準（案）、水文観測（マニュアル）、通商産業省公益事業局では流量調査基準が作成された。実作業においてもこのような形で統一化と精度向上が図られて行った。

昭和53年（1978年）10月31日　科学技術庁資源調査会（小委員会長 木下武雄）は「水情報システムの現状とその改善に関する報告」を科学技術庁長官熊谷太三郎に提出した。これは国際連合アジア太平洋経済社会理事会で取り上げられ、アジア太平洋の国々において類似の調査をして、水情報システムの改善がなされた。

水位流量観測所は合計で約2,400ヶ所で、内訳は次の通りである。

表1　1978年における流量観測所数

	建設省	通商産業省	農林水産省	水資源開発公団	合計
観測所数	1,460	735	168	23	2,386

問題点としては①水位計零点高の確認、②水位観測資料の時間的連続性、③結氷河川の水位及び流量観測、④水位の読取単位、⑤観測の確実性の向上、⑥流量測定の精度、⑦流速計の使用と検定が指摘されている。

６．流観作業

流観作業には色々の指針すなわち基準・規程等がある。年間の回数については5.（1）で述べた。その他の2,3について述べる。

(1) 測線数

前記の水位および流量調査作業規程準則によれば、水面幅に対する測線数（横断面上、可搬式流速計を入れる位置、浮子を投入する位置を測線と言い、その数）は可搬式流速計、浮子ともに同数である。同準則にはさらに、高水時には水面幅に対する浮子の測線数を約半数に減らして行うように示している。いわゆる緊急法である。高水時には水位の上昇・下降が速いので時間をかけて測った場合、観測中の断面積、流速の変化から発生する誤差と、測線数を少くしたことによる誤差とどちらが大きいか、それを避けるためにどちらを選ぶかの問題である。横断方向の流速分布についての水理学的な法則はあまり定説がないから、慎重に決めなければならない。準則の測線数も大胆に決めているが、運用する側も、もっと大胆に、水面幅を河川幅と読みかえて、測線位置を固定し、実質的にはこの緊急法の半分くらいの測線数しかない例もある。

低水流観について前記の準則によれば、精密測定を随時行うことになっている。その時は、2倍の測線数で密に測定して精度検証をするよう示している。果たして精度検証しているのだろうか。

表2　測線数

水面幅	20m未満	20～100m未満	100～200m未満	200m以上
測線数	5（10）	10（20）	15（30）	20（40）

（　　）は低水流観の場合の測線数
流速計、浮子共通

(2) 測線内の流速測定点（可搬式流速計）

通常、可搬式流速計を鉛直方向に水中に固定する位置は、一点法では水深の6割、二点法では水深の2割、8割とされている。流速の分布を2次曲線と仮定しているからで、今後検証すべきである。精密法では水深20cmごとに行う。最近、精密法を実施した例を聞かない。この点の実施については、精密法を除いて、準則通り行われているようである。

(3) 測線における浮子の適用

河川の鉛直断面内の流速分布は、等流と思われる流れでも水理学的に未だ解明されているとは言い難い。そのため、水深に対して、どのような吃水長の浮子を投入し、測られた流下速度にどのような係数を適用するかは未定と言える。しかし準則で、未定とは書けない。安芸皎一が、水理学資料の欠陥を内閣総理大臣に報告したのが1951年で、多くの関係法規とともに準則ができたのが1954年であるので、可成り急いで準則がまとめられたのであろう。

それまで安芸（皎一）の式と呼ばれる式が有力であった。

その他にもFrancisの式とかあるが、当時の話しを仄聞するに、流観担当者はこれらの係数を任意に選ぶため浮子の吃水長、更正係数のとり方が混乱していた。そのため、当時の主たる河川技術者が集まって、準則のような吃水長、更正係数をひとまず決めた。そして、その後、妥当な係数が判明したら、計算し直して、妥当な流量にすればよいとした。技術の進歩のステップとしては当然であった。

安芸だけでなく、物部、春日屋なども流速分布を2次式と仮定して流体抗力を1次式的に取扱っている。流速分布を1次式と仮定すれば流体抗力を2次式的に考えても容易に浮子更正係数が計算上求められる。[4] 木下武雄は浮子の吃水比と、河床流速／表面流速との2次元座標で更正係数を表示し、準則の更正係数と世界気象機構WMOの更正係数（吃水比で決められている）とも比較した。これによるとWMOの更正係数は吃水比で決められていて河床流速／表面流速が凡そ0.7のあたり、つまりあまり

流速の鉛直勾配のない状態を仮定している、さきの準則と比較すると、浅い河川（例：0.5m浮子）では上の流速比が小さい場合に対応する。深い河川（例：4m浮子）では上の流速比が大きい場合に対応する。

(4) 流観作業のまとめ

流観作業については、この他にもとても書ききれないぐらい多くの課題がある。これをやさしく、くだいた説明書に「絵で見る水文観測」[5] がある。

1954年という50年以上前の制定の準則を今も守っているのはおかしい。河川技術の大先輩の言う通り、今後妥当な係数が判明したら改訂すべきである。技術基準というのは本来そういうものである。改訂するにはそれを立証する高度技術が必要で、今こそ、そのような技術を駆使できる時に来たのである。

7. 流量を測る高度技術

(1) いろいろな方法

流量を測るには色々な方法がある。小流量から大流量まで色々考えられる。現在の技術では不可能でも、将来、高度技術として可能になるかも知れない。そのような方法を列挙したもの[6] に水文環境技術レポートNo.2［改訂］「河川流量観測手法のいろいろ」がある。そこでは、①体積を測る、②水位等の測りやすい要素から流量を求める、③流速を測る、④熱放散を利用する、⑤超音波を流れの中に伝搬させて流速を測る、⑥電波を流水の表面に当てて流速を測る、⑦トレーサ移動追跡、⑧管路における流量測定手法について、原理・実用例を含め、詳細に述べている。あえて馬鹿だと言われそうな方法も含めてある。この他の方法もあるであろうが、とにかく高度技術を開発するなら、まずあらゆる方法を俎上にのせるべきである。

(2) 対象河川の特性

高度技術の導入にはまず、目的を明確にして、対象河川の特性、つまり河道条件、流量と流速の変動幅、要求精度等を考慮すべきである。電波流速計がある。河川表面の形状移動速度が測れる。通常、表面浮子の更正係数0.85を掛けてその測線の平均流速としている。この仮定が成立つ（浅い）河川であれば連続流量観測が可能であるので極めて有効な方法である。しかし、深い河川で係数0.85が疑問ならば別途に更正係数を考えねばならない。それにはADCPなどで流速の鉛直分布を測って、それに応じた更正係数を利用しなければならない。適用流速についても考えておくべきである。

どのような河川でも、どのような流量でも一つの方法で測れる事はない。他の河川で成功したから、こちらでやって見る、というような考え方ではなく、独自の方針で高度技術を導入することを考えた上で、他の河川の例を参考にするというのが、正当なシナリオである。

独自の方針を立てる時には目的を明確にして、多分野の専門家の協力が必要なこともある。

話はそれるが、1965年頃筆者がレーダ雨量計の導入に関心を持ったのは、レーダによる雨滴の観測に理論的な欠陥は明らかであっても、利水ダムの出水時の操作に河川の従前の機能の維持を義務づけるには、事前放流をせねばならないので、その補償のために、空中の雨滴の多寡を知ることを目的としたのであった。

(3) 水中でのドップラー観測

ADCP（Acoustic Doppler Current Profiler の略で、直訳すれば、音響ドップラーによる流速断面測定器となる）では、4個のセンサーを船底に装着する。各センサーは鉛直下方に対し20° 傾いた方向に超音波を発射する。超音波は水中の浮遊物に当って返って来るが浮遊物の動きによって周波数の変化が生じる。それがドップラーと呼ばれる現象である。周波数の変化から伝搬方向の浮遊物の運動がわかり、図2でA, B, C, Dでの運動を合成して流向流速がわかるというのが原理である。但し、ここで注意すべきはAとC、BとDにおける浮遊物の運動が一様かということである。一様でなければ流向・流速には大きな誤差を伴なう。事実、横断面で、小区画ごとに得られた流速で横断面内の剪断力を求めると、とても大きな値になって、水理学的に理解できない。しかし全断面の流量は、他の方法と比較して、凡そ妥当と推定される。この傾向は筆者の計算（未発表）とも合う。

不感帯の流速推定とか、船速補正とか色々課題はあるが、仮定条件を理解した上での流量観測には有効である。

通常のADCPは船に装着して河川横断方向に船を走らせるので、連続観測はできない。この改良型で、河床にとりつけ上方に超音波を発射して連続観測する方法や、河岸にとりつけ水平方向に超音波を発射して連続観測する方法もある。

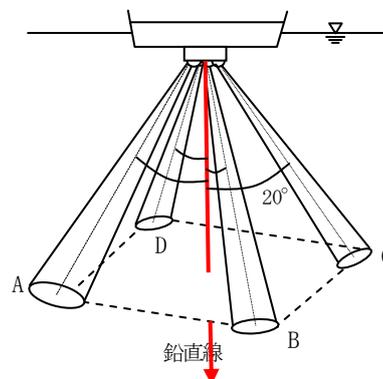



図2　ADCP説明図

(4) 流水中の超音波パルス伝搬

流水中に超音波パルスを伝搬させると、流れにのれば速く、流れに逆らえば遅く伝搬する。この時間差から流

れの速さを求めることができる。時間差を読むには精度の高い時計が必要である。それが十分でなかった時代には、一方向の伝搬を繰返し、一定時間に何回繰返せるかを測り、逆方向についても同様に繰返し、その繰返し周波数の差から流速を求めた。これをシングアラウンド法と言う。

時間の精度が上ると、パルス伝搬時間差を計時できるので、パルス伝搬時間差法が普及した。これには音速が水温・塩分で変わるための補正が必要であった。

伝搬時間の逆数をとってその差を作ると、流速を求めるのに音速が消去され、その補正がいらなくなった。あるいは2方向の伝搬時間和から音速を求めることが可能で、この音速を用いればあえて、水温・塩分を測らなくてよい。

以前は閾値を決めて、波の立ち上がり部分で時間を読んだが、今は波を全体として相関係数により時間差が算出される。

このように超音波パルス伝搬時間差法も、コンピュータの進歩でデータ処理に大幅な向上がみられる。それでも水中における超音波の挙動には手を焼く。水温変化等による音速変化の補正はできるが、水中の音速分布、特に鉛直分布による屈折は大きな障害である。屈折の推定式はあるが、曲げられたものは仕方ない。改善方法として、周波数を下げて、屈折して河床・水面に当たってもエネルギーが対岸まで届くような強力な音波を出すとか、川幅を分割して屈折しても受波できるように短いスパンで測るとかの方法がある。

伝搬方向の主流向との角度θが$\cos\theta$という形で計算式にはいっているので河川に偏流があると誤差になるので、送受波器を2台で対向させないで、3台をV字形に配置して偏流の影響の主要部分を消去する方法もある。

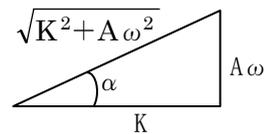
洪水観測には濁度が災いするかも知れないが、音響インピーダンスから判断すると、浮遊土砂よりも気泡の方が障害になる。河川環境管理財団の研究助成[7]による実験でもその傾向が明らかになっている。

よく知られているように感潮河川の水位流量関係は楕円を描く。

外海潮位を$H_0=\sin\omega t$とし、貯留域の水位をH、面積をA、河口の順流流量をQとする。ωは潮汐の角速度である。河口の運動方程式を$Q=K(H-H_0)$と線形化して解くと[8]

$$H=\frac{K}{\sqrt{K^2+A^2\omega^2}}\sin(\omega t-\alpha)\ \cdots\cdots \quad (7)$$

$$Q=\frac{-A\omega K}{\sqrt{K^2+A^2\omega^2}}\cos(\omega t-\alpha)\ \cdots\cdots \quad (8)$$

αは位相のズレで、下の三角形より求められる。

このような現象を実測で検証できるのは水中に固定した超音波パルス伝搬時間差及びその改良形しかない。

8．むすび

流量観測をここまで組織的に行ってきたのは国、特に国土交通省河川局傘下の機関であった。経済産業省の主として水力発電に係わる分野、農林水産省も実施して来た。ユネスコのIHD-IHP以来、大学・研究機関の貢献も忘れられない。観測とは継続的に行うから意味がある。技術基準を明確にして行うわけであるが、その基準は技術の進歩とともに改訂されるべきである。そうすると精度などあるいは結果の数値さえも変ることがありうる。この矛盾をどうするか。例えば浮子の更正係数の新しい値が求められたとする。かつての大先輩の言葉のように全データを改めるのは良心的ではあるが、混乱も招く。高度技術ではっきりしたところから逐次修正して行くのが現実的であろう。最初に述べたように、〇〇川の××地点で流量を測り、治水・利水に役立てるのではあるが、またそれは地球の流量を測るということにもなるので、地球人の連帯という考えで前進しよう。

参考文献

1) 木下　武雄：等流HQ式による流量の照査，水文・水資源学会2001年研究発表会要旨集，pp.30-31，2001.
2) 水文環境技術レポートNo.12　水文観測:㈱水文環境，2007.
3) 資源調査会報告第9号：水文学資料の欠陥に関する報告，経済安定本部資源調査会　昭和26年9月25日.
4) 木下　武雄：浮子更正係数の一考察，水文・水資源学会2003年研究発表会要旨集，pp.156-157，2003.
5) 中部地方建設局：絵で見る水文観測
6) 水文観測技術レポートNo.2（改訂）：河川流量観測手法のいろいろ，2005年
7) 木下　武雄：超音波流速計の洪水観測への応用，第8回河川整備基金助成事業成果発表会報告書,財団法人河川環境管理財団,平成13年10月
8) Kinosita,Takeo: Improvement of ultrasonic flowmeter in revers in Japan, Adcvanced in Hydrometry, IAHS Pub. No.134, 1982.

(2010.7.20受付)

ADCPによる河川洪水観測の先進技術と観測に際しての基礎的な技法について

AN ADVANCED ADCP TECHNOLOGY FOR FLOOD OBSERVATION AND FUNDAMENTAL TECHNIQUES.

橘田隆史[1]・下田力[2]・疋田真[3]・Hening Huang[4]

Takashi KITSUDA,Chikara SHIMODA,Makoto HIKIDA and Hening Huang

[1]非会員　農学修士　（株）ハイドロシステム開発（〒574-0016 大阪市港区弁天5-10-23）

[2]非会員　水産学修士　（株）ハイドロシステム開発（〒132-0015 東京都江戸川区西瑞江3-19-10）

[3]非会員　（株）ハイドロシステム開発（〒132-0015 東京都江戸川区西瑞江3-19-10）

4非会員　Ph.D　Teledyne RD Instruments (14020 Stowe Drive Poway, CA, U.S.A)

This report discusses about the advanced technology of measuring flood flows using ADCP made by Teledyne RD Instruments. Specifically, this report focuses on the tethered boat ADCP observation method for a flood with high-speed current. It describes the appropriate equipment composition, measurement method, and data processing procedures based on the writers' own experience as well as the information exchanged with ADCP users/experts. Two kinds of tethered boats were developed and examined. One is the for high-speed current and the other is for low-speed current. The high-speed boat, demonstrated its safety and stability, was successfully used to measure discharge in a flood flow as high as 4.5m/s.

Key Words : *ADCP,flood,observation,洪水流量観測,観測ボート,*

１．はじめに

本報は，ADCP(Acoustic Doppler Current Profilers)を用いて河川洪水観測を実施する際の，観測計画の立案，観測方法およびデータ処理に関する基礎技術について取りまとめた．ADCPとはTeledyne RDInstrument社（以下，TRDI社と記述）のドップラー多層流向流速プロファイラーを示し，本報では特に，高速流が生じる出水時の橋上操作観測における課題を中心テーマとした.

ADCPの河川利用が本格化し始めたのはここ10年程度と比較的新しいが，米国ではU.S. Geographical Survey（以下、USGSと記述）が主体となって流量観測技術に関する調査研究と，実務者の技術向上を目的とした観測技術マニュアルの作成や講習会を行っている[1]．我が国でも洪水観測において，従来の浮子観測に加えてADCPを活用する研究が活発化してきており[2, 3]，日本の河川事情に即した観測手法の確立を望む声が多い．著者らはADCP販売側の立場として多くの技術者と意見交換してきた経験を基に，見落とされがちな基礎的技術情報の抽出にも留意しつつ，適切な機器構成，観測方法，データ処理方法について記した．なお本報は，ADCP観測実務者を対象として，基本的なADCPに関する用語が理解されていることを前提として執筆した.

２．ADCP開発の歴史と技術動向

(1) ADCP開発の歴史

RD Instruments社（現Teledyne RD Instruments社）は1982年にFran RowとKent Deinesらによって設立された．社名は両氏のイニシャルに由来する．同年、RDI社はNASAの支援を受け、世界で初めてドップラー式多層流向流速計のプロトタイプを開発し，翌年にはADCPとして販売を開始した．1991年にONR（Office Naval Research ： US Navyの研究機関）の支援を受け，ブロードバンド技術による流速計測技術を開発し，空間解像度，流速計測精度およびデータ取得時間を飛躍的に向上させることに成功し，ADCPが普及する大きな転機となった．また，1995年にはWorkhorseタイプと呼ばれる，小型で安価な普及品を開発したことにより，我が国においても海洋研究分野を中心に広く普及してきた.

(2) 河川分野におけるADCP計測技術の進展と課題の整理

TRDI社は10年ほど前に陸水部門を組織編成したことを契機に，河川利用を主目的として，ZedHead（ゼロブランク）タイプ，新しいハイレゾリューション機能（Mode11），ハイスピードサンプリング機能（Mode12），小規模河川向け計測機（Stream-Pro ADCP）など様々な

商品や技術開発を進めてきた．さらに近年では洪水観測用の600kHzタイプや，著者らによる高速流低揺動型の橋上操作艇が開発されるなど，河川利用の幅が格段に拡がってきた．しかし，我が国では，出水時に安全かつ安定的に計測する手法に乏しかったこと，河床移動が生じる際にボトムトラック機能では正しく計測できないこと，従来法との整合性の問題，などを主な理由に，ADCPの出水観測利用には慎重な意見が多い．

a）出水時の移動観測方法について

出水時に船外機船を出航させて曳航観測を行うことは極めて危険であるため，ADCPは洪水観測には不向きであるとされてきた．木下ら[4]はADCPを搭載した空力型のラジコンボートを独自に開発して観測を行ってきたが，その特殊性から広く普及するには至っていない．また，岡田等が検証した水中プロペラ式のラジコンボート観測手法では，流速2. 5m/sを実用範囲と評価しており，適用範囲が限定される[5]．一方，1997年に米国Oceanscience社(以下，OS社と記述)等によってADCP搭載型の無人橋上操作艇が開発され，橋上から下流にADCPを係留させ，横断方向に徒歩で曳航する方法が考案された．開発に際しては，USGSと共同で数々の試作機を製作し，最終的にトリマランタイプを商品化させている．これが大きな契機となってADCPによる洪水観測の研究が進み，国内でもここ数年で急速に当手法が普及してきた．しかし，転覆の危険性や，大きな揺動によるデータ欠落，最大流速3.5m/sまでの実用性などが問題点として指摘されており[6]，依然として大規模出水時の観測は難しかった．こうした問題を解決するため，筆者らは高速流でも揺動が小さく転覆しにくい構造の無人橋上操作艇を考案し，実用化に成功した．詳細については，後段で紹介する．

b）河床移動時の問題

ADCPはボトムトラック機能により自機の移動航跡を取得することが出来る．しかし，出水時に河床移動が生じる状況下では，このボトムトラックは正しく機能せず，自機が上流方向に不作為な航跡を描くとともに，流速が過小に計測される場合がある．これを回避するため，USGS[7]では，河川を数往復して河床移動を平均化し後処理で流速を補正する方法，河川横断の任意のポイントに停止させてボトムトラックを使わずに連続的に1分間程度計測し，区分断面積と平均流速から流量を算出する方法(section by section method)，などを提案しているが，いずれも不確実性が多く利用しにくいため，普及していない．一方，以前からTRDIが推奨していた技術であるRTK-GPSを併用して高精度な測位データからADCPの移動航跡を計測させる方法が最も確実な方法であると再認識されてきており，この方法により河床移動に対する問題はほぼ解決されたと考えられている．

c）従来手法との整合性について

ADCPで計測された流量値が浮子流量と比べて小さく算出されると指摘する研究者は多く，二瓶ら[8]は更生係数と河岸際の相対誤差により1～3割小さく算出されると報告している．また著者らは，橋脚後流の影響が生じる場合はADCP流量が2～3割小さく算出されることを経験しており，こうした現象がADCPによる流量観測精度の信頼性を疑問視する大きな要因となってきたほか，従来法との不整合を懸念して観測方法として採用されにくい背景を作ってきた．しかし，表層付近の流速を比較すると両者は非常に良く一致することも知られており，流量値の乖離については，その算出方法に原因を見いだすことができる．浮子観測は橋脚と橋脚の中間付近から投入するのが一般的であり，橋脚後流付近は避けて観測することが多い．このため，浮子観測では流速の早い区間を選択的に計測してしまう恐れがある．一方，ADCPで断面を計測した場合は，橋脚後流の影響区間も含めて断面流速分布を詳細に計測することができるため，結果的にADCP流量が小さく算出される場合があると考えられる．これは，浮子とADCPの原理的な違いに起因するものでは無く，同じ浮子観測において測線をより密に設定した場合にも起こりえるものと考える．こうした問題はADCPの洪水観測技術が進歩してきたが故に出てきた新たな課題であり，ADCPを活用して浮子観測の更生係数や適正な測線配置などを検討し，従来法の精度向上を図ることも有効であろう[9]．

３．ADCPによる洪水時移動観測技術の最新動向

(1) 可搬型洪水観測システムの開発

著者らは，洪水観測用途に，安全で効率的にデータ取得するためのシステム（商品名：可搬型河川流量計測システム）を開発した．機器構成は，WorkhorseADCPモニタータイプ（短胴型），RTK-GPS，音響測深器，遠隔オペレーション装置（商品名：RemoADCP）が基本となる．橋上から下流側に無人操作艇を係留し，徒歩で橋上を横

A.ADCP　B.RemoADCP　C.RTK-GPS

D.Battery

E.音響測深器

F.Remo陸上局

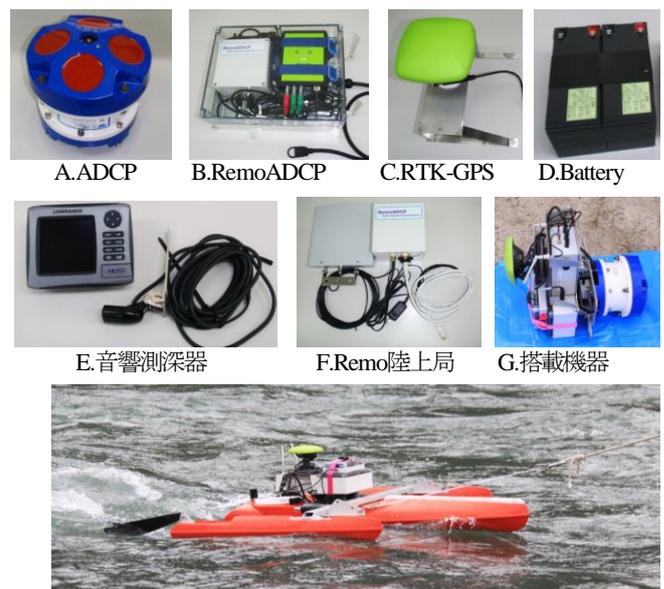
G.搭載機器

H.全て搭載して観測している状況

図-1　可搬型洪水観測システムの機器構成

断しながら断面流量を計測させる方法のため，観測は3名程度で十分対応可能である．RTK-GPSは，出水時にボトムトラックがロストすることが多いため，可能な限り標準で装備することが望ましい．音響測深器は，ADCPの超音波による河床距離がそれぞれ20°方向に発射しているため，ADCP直下の河床距離を計測するために使用する．音響測深器の周波数は200kHzタイプを標準としている．また，ADCP，RTK-GPS，音響測深器の各データを遠隔で同期取得するため，RemoADCPを使用する．ADCPの遠隔コントロールができるため，観測者は車中や橋上からリアルタイムにデータを確認することができ，観測効率の向上が期待できる．

(2) 高速流低揺動型曳航ボートの開発

急流場においても揺動が小さく，安定してADCP観測を行う目的で，著者ら[10]はハイスピード型（設計流速6.0m/s）の橋上操作艇を研究開発してきた．橋上操作艇の基本設計に際し，モノハルタイプとトリマランタイプの船体設計を行い，1/3スケールの模型により土木研究所内の実験水路で挙動試験を実施し，基本構造の妥当性を検証した．また，試作機を含む4種類のボートにADCPとモーションセンサー(MEMS)を搭載し，実河川にて検証を行った．その結果，船体基本構造としてはトリマランタイプが有利であり，モノハルタイプは水面形の影響を受けやすく，ジャンピングや前後へのポーポイジングなどが生じやすいことが確認された．

トリマランタイプの揺動を抑制するためには，サイドハルの長さ，浮力，取付位置，および船体全長と重心等が影響するため，船体安定計算により最適な船体バランスを導き出した．また，橋梁と水面の高低差が大きい場合は船首が上方に傾斜しすぎてADCPの傾斜補正限界である15°を越えることもあるため，重心バランスをユーザーが容易に変更できるよう，前方にも収納ハッチを設けて，バッテリー配置などによって重心バランスを変化させやすくした．

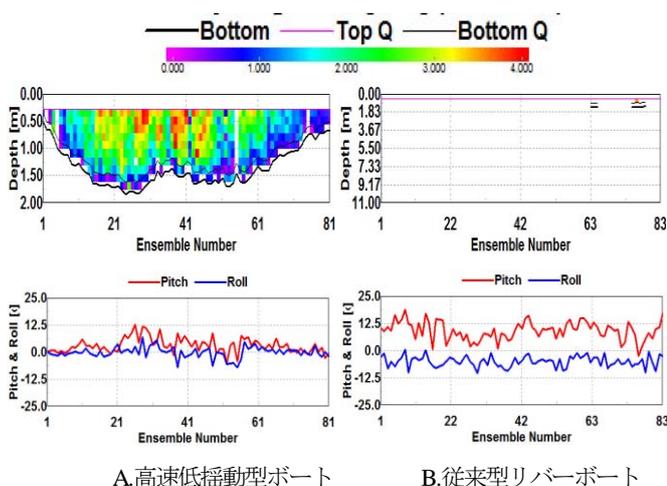



図-2は黒部川急流域にて，従来型のリバーボートと高速低揺動型ボートを用いて比較観測を行った結果である．リバーボート(図右)は船体揺動が激しいためにほとんど欠測していたが，高速低揺動型(図左)ではデータ欠損が少なく，流速4.5m/sの状況下で，安定的に，かつ安全にデータを取得することができた．従来のリバーボートの場合，揺動安定性や転覆のリスク，データ取得率などを考慮すると，実際には流速3.5m/sが実用限界との報告がある．しかし，高速低揺動型のボートを使うことで，転覆のリスクが格段に減少したこと，水面揺動の影響が抑えられてコントロールしやすくなったこと，揺動によるデータ欠損が著しく改善されたことなどから，実用流速として5.0m/s以上でも使用できると考えられる．船体の耐久設計は流速6.0m/sであるが，今後実河川での検証が必要である．

図-2　高速低揺動型ボートの比較観測

(3) 洪水観測専用型ADCPの登場

河川洪水観測向けにフェーズドアレイ600kHzタイプのADCP（商品名：River Observer）が新たに開発された．フェーズドアレイとは，単一フラット面に微少な素子を数千単位で配列させ，電子制御で音波の位相を変調させて発射角度をコントロールする技術であり，低周波・大出力のセンサーをコンパクトに製造できるメリットがある．当機は，低周波高出力センサーによって高濁水による超音波減衰や，河床のロストを低減する目的で開発された．また，従来の600kHzタイプは標準モードで実用観測層厚が50cm程度と大きいことが問題であったが，当機は従来のハイレゾリューションモードに使われているパルスコヒーレント技術を採用し，低周波ながら最小層厚10cmでデータ取得可能であり，低周波タイプの高

表-1　River Observerの観測層厚設定

水深：D	層厚	表層層厚	表層層数
D > 10m	80 cm	10cm	5
10m > D > 4m	40cm	10cm	5
4m > D > 2m	20cm	10cm	3 または 2
2m > D	10cm	N/A	0
0.45m > D	N/A	N/A	N/A

A.標準型ボート

B.センサー

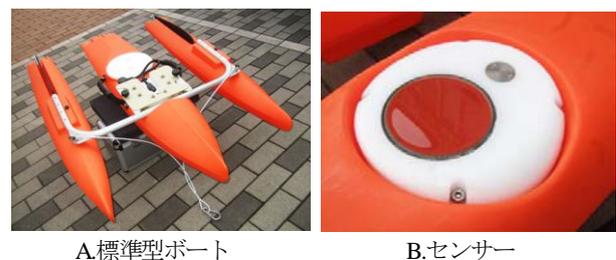



図-3　River Observer600kHzタイプ

濁度耐性と高周波タイプの空間分解能を併せ持つタイプといえる．また，フルオートモデルであるため，従来のような観測設定が不要となり，ユーザーは開始と終了時に命令を送るだけで観測出来る．表-1に水深毎の観測層厚設定を示す．River Observerは水深を先に計測して表-1に示す様に観測層厚と層数を自動設定するほか，データは常に1ping毎に取得され，平均処理は後処理で行う仕様である．このため，従来のように，観測者の技量によってデータ取得精度に違いが生じることが無く，誰が観測しても一定のデータ品質が確保されるというメリットがある．なお，標準でボートが装備されているが，高速流低揺動型ボートに搭載することも可能である．

(4) アプリケーション

a) WinRiverⅡ

WinRiverの後継ソフトがTRDI社からリリースされている．前述のRiverObserverのオペレーションに対応した他，流量演算アルゴリズムの見直しや操作性の改善を図っている．

b) S×S Pro (section by section method)

橋上操作艇を用いてADCPを断面の各測点で連続データ取得させ，断面の流量を演算するための専用アプリケーションである．水面や河床の補間方法，断面の補間方法などがきめ細かく設定できる．本手法を用いれば，河床移動が生じる際にRTK-GPSが準備できない場合にも流量観測が実施できるメリットがある．

c) VisualADCPtools

著者らがADCP使用者の立場から長年の経験に基づき開発したデータ処理ソフトウェアである．TRDI社の付属ソフトウェアでは行えないノイズカットや移動距離平均機能や蛇行航跡の直線化機能を備えているほか，各種データ処理，流量演算，コンタ図やベクトル図などのグラフィック出力が可能である．後処理で正確な流量を算出する際に便利である．

d) ADCPによる濁りと土砂フラックスの算出

筆者らは，ADCPの反射強度から濁度を算出する汎用アプリケーションの開発を進めており，当該技術をABT(Acoustic Backscattering Turbidityの略)と呼んでいる．ADCP 1台で流速と濁度が同時に計測できることなどから，河川の土砂フラックス計測に有効であると考えている[11)]．従来，反射強度から濁度を算出するには複雑な解析作業を必要としていたが，この汎用アプリケーション化によって，現場でも簡便に濁度への変換が可能となる．

この技術は，Thorneの式を中心とする各種音響理論式を駆使して，水塊の音響吸収と散乱を漸次的に求めるものである．しかし，理論式だけでは再現できない要素も多いため，キャリブレーションのために現地にて水温，塩分，濁度のプロファイルデータ取得が必要である．

流量データと合わせて断面の濁度分布と土砂フラックスを計測できるメリットは大きく，また，過去に取得しているデータを使って再現計算させることも可能であるため，活用範囲は極めて広いと期待される．

４．ADCP流量観測方法の基礎的検討

(1) 機器選定

WorkhorseADCP1200kHzを使う場合，層厚25cmで最大計測水深が14m前後，層厚50cmで最大計測水深が16m前後となる．実際には水深20m付近まで計測できた事例もあるが，出水時は濁りが強くなるため，それよりも深い場合は最大計測レンジの長い600kHzを選択した方が良い．また，高濁度が予想される場合は低周波タイプである600kHzが有利とされている．一方，ロングレンジモードと呼ばれる標準機能(WB1)を使うと最大計測距離が20%ほど延びるが，データ取得時間も延びるため，洪水観測には不利である．2001年以降に販売された1200kHzのZedheadタイプは，近接不測距離が短く，Mode11,Mode12が使える点で有利である．

(2) 各観測モードの特長と適用限界

ADCPには計測精度を高めるためのオプション機能が提供されているが，適用条件が定められており，使い方を誤るとデータが取得出来ない場合がある．標準はMode1であるが、この他にハイレゾリューションモード（Mode5,8,11）、およびハイスピードサンプリングモード（Mode12）が存在する。ハイレゾリューションモードはパルスコヒーレントと呼ばれる計測原理を採用しており，水深が浅く流速が遅い場合に高精度計測が可能となる．一方，ハイスピードサンプリングモードは、通常のメインピングに加えてサブピングと呼ばれる高速発信が可能なpingを用い，時間あたりのping数を増加させることによって計測精度を高めるものである．サブピングは，チルトピッチ補正など一部の内部演算処理を省略することにより高速化を図っている．なお，ping数とstdの関係はMode1と同じである．表-2に，各モードの適用条件を示した．Mode5は最大相対流速が1.0m/sであるため，洪水観測には向かない．また，このモードは非常にデリケートでデータ欠損が生じやすいとされている．Mode11はその後継にあたる安定バージョンであるが，水深×相対流速が1.0m^2/s以下の範囲で使用しなければならず，水深4.0mなら流速は0.25m/sが限界となる．

表-2　各モードの適用条件

	流速上限	水深上限	層厚	Std/ping
Mode5	最大　1.0m/s	3.5m	10cm	0.4cm/s
Mode8	最大　2.0m/s	3.5m	25cm	5.0cm/s
Mode11	水深×相対流速 <= 1.0m^2/s	4.0m	10cm	0.7cm/s
Mode12	Mode1に準拠			

Mode8は流速2.0m/sで水深3.5mまで計測できるが，計測精度はかなり落ちる．Mode12は計測条件に縛られずに精度を高めることができる．

(3) 標準的な観測設定の検討

ADCPの観測に際しては現場の状況に応じて最適な設定を行う必要がある．主な設定項目としては，層厚(WS)，層数(WN)，Ping数(WP,BP)，近接不測距離(WF)，最大レンジ(BX)，Ambuigity Velocity(WV)などが挙げられるが，ここでは観測精度を確保するための層厚とping数を中心に検討する．

ADCPの観測精度はping数に依存するが，ping数を多くすると1アンサンブルデータの取得時間が長くなり，横断方向の空間解像度が低下するという問題がある．徒歩(移動速度1m/s前後)で観測する場合，横断方向に1～2m間隔程度でデータ取得させるためには，1アンサンブルデータ取得を2秒以内に設定することが目安となる．なお，WPとBPは同数を設定することが推奨される．

図-4に，ping数とstd(標準偏差)の関係を示す．図から，層厚，データ取得時間，観測精度の最適バランスを考慮すると，1200kHz Mode1の場合，WS25,WP20程度，600kHzの場合は，WS50,WP20程度が適切であると考える．なお，Mode12の場合は通常のWPコマンドに加えてサブピングコマンド(WO)が設定可能で，WP 1pingに付属して発射するサブピングの数と間隔(ms)を設定できる．

観測層厚と層数は最大水深を元に設定する必要があるが，最大計測レンジが大きくなるとデータ取得時間が長くなるため，最大水深の2～3割増し程度に設定することが望ましい．なお，ボトムトラック機能の最大探知深度を設定するコマンドBXは単位がdmなので注意が必要である．

図-4 ping数とstd(標準偏差)の関係

(4) 洪水観測時に注意すべき観測設定

洪水観測の様に高速流を観測する場合は，Ambuigity Velocity(WVコマンド)の設定が重要となってくる．デフォルト値のWV170(機種によっては175)では最大相対流速4.2m/sまでしか対応できず，これを超えるとバラツキが顕著になる．Ambuigity Velocityはブロードバンド特有のコマンドで，具体的にはWVの数値が計測可能な最大のAmbuigity Velocity（ビーム放射軸方向の最大流速）として設定され，次式で求められる．

WV＝水平最大流速×sin(20deg)×1.2(安全率)

ここで，水平最大流速は船速＋実流速の和となる．例えば水平最大流速を450cm/sと仮定した場合，最適なWVは185となる．

初期のナローバンドタイプは長い一定パルス幅の超音波を使ってドップラーシフトを計測しているが，ブロードバンドタイプでは，短いパルス幅の音波をペア（パルスaとb）で発射し，両者の位相差を計測することにより速度を算出している．後者の場合，送受波の位相差が180度を超えると流速を誤認する恐れがあるため，事前に最大測定範囲を規定する条件を設定しておく必要がある．その条件がAmbuigity Velocityである．したがって，最大流速が4.0m/sを超えることが想定される場合は，安全をみてWVを大きめに変更する必要がある．

また，ボトムトラックに関しても，ボトム認識感度をチューニングするためのエキスパートコマンドが幾つか存在する(BA,BC)．しかし，非常にデリケートな設定で，適切な使用方法が確立されていない．また，これらのコマンド変更で取得率が改善できる余地は少ないため，通常はデフォルト値が推奨される．

(5) 流量算出手順

ADCPで観測された断面流速分布から流量を算出する方法として、TRDI社が無償提供している標準ソフトのWinRiver(WinRiverII)で計算させる方法が簡便で便利である．しかし、ノイズ成分の除去が自由に出来ないことや，激しい揺動が生じた際によくおこる航跡ジャンプ現象などを補正することが出来ない．また，水面や河床付近，および測岸の補完方法に自由度が少ない．このため，できるだけ正確な流量値を得るためには観測者が独自に流量算出する必要がある．流量算出の手順としては，
ノイズ除去と補完，表層・底層の補完，側岸の補完，航跡の直線化，流下軸成分流速の抽出，断面流量の算出，というステップが標準的である．

WinRiverの流量算出方法は，アンサンブル毎の航跡直行成分を積分していくため，航跡が蛇行していても正しく流量算出される．一方，蛇行航跡を横断測線上に直線化させて直交成分を積分する方法でも原理的には同じ計算結果が算出される．しかし，前者は航跡距離が横断距離を超える場合があるが，後者は横断距離と川幅が一致すること，断面流速分布が流下軸成分と等しくなるなど，図化する際にメリットがある．

⑹ 流速の品質判断項目について

ADCPで取得したデータの品質を判断する項目として，%Good(PG1,PG4),反射強度，correlation, error velocityなどの情報がバイナリーデータに記録される．

%Goodは，1アンサンブルあたりのpingの内，適正に受信・解析できたping数の割合を示し，PG1は3beam計測時，PG4は4beam計測時の値である．%Goodの閾値は一概には言えないが，経験値としてPG1とPG4の合計が60～80%付近を棄却の目安としている例が多い．

反射強度は直接的にデータ精度を示す指標では無いが，干渉が生じた場合は示唆的な反応を示すほか，高濁度で減衰した場合などは著しく低下するため，データ異常を判定する補助的な指標として有効である．

Correlationとは，1pingを構成する2発の超音波受信波の類似性を示す指標であり，100%が255countに該当する．計測されたデータのCorrelationが高ければ，時差を持つ2発の超音波が同じ流れを計測しているとみなされ，データ品質が高いと判断される．デフォルトではこの数値が64を切るとBadデータとして棄却される．

Error velocityは4つの超音波ビームが計測している流れ場の均一性を判断する指標である．ADCPは20°に開いた4本の超音波ビームを発射するために遠方ではある程度の広がりを持った空間を計測することになる．目安としては，水深と同程度の直径範囲の平均を計測しているイメージとなる．ADCPはこの各ビームの測流範囲が同じ流れ場であるという条件の元に流向・流速を算出しているが，実現場では必ずしもそうはならない．この為，ADCP開発当初に相当な議論を経て，Error velocityという概念が考案された．これは，対向する2本のビームから1軸方向の流速値を算出する際に，u1成分とz1成分が求められる．さらに直交する2本のビームでも同様にu2成分とz2成分が求められるが，流れが均一であればz1とz2は一致するため，両者の差は0となる．この差が大きいほど，不均一な場であることが推測される．error velocityによる明確な異常値判断基準は設けられていないが，実測流速と同程度かそれを超えるerror velocityが生じた場合には，不均一性に起因する誤差が増大していると判断できる．

６．まとめ

ADCPを用いた洪水観測の先進技術と，観測の際の基礎的な技法について取りまとめ，報告を行った．常時流量監視技術に関しては，HQ方式の他，H-ADCPもしくはADCPによる方式，電波ドップラー表面流速計測法や,超音波伝播時間差式などが実用化されているが，いずれの手法もリファレンスとなる高精度な流量データが不可欠である．一方，洪水時に精度良く流量観測できる移動観測手法としては，従来の浮子法にこれまで大きく依存してきたが，ADCPの洪水観測技術がここ数年著しい進歩を遂げており，苦手とされてきた河川洪水観測においても十分に実用的な成果が得られるようになった．しかし，その取り扱い方法やデータ処理については個々人の技量に委ねられているのが現状であり，標準的な技術指針の確立が望まれるところであろう．

謝辞：高流速低揺動型ボートの開発および水路実験にあたっては，土木研究所，高知工業高等専門学校准教授 岡田将治殿，大阪府立大学助教 新井励殿に多大なる協力を得た．高速流低揺動型ボートによる現地比較観測は,土木研究所ならびに富山県立大講師 手計太一殿の協力を得た．ここに記して謝意を表する．

参考文献

1)Michael R.Simpson.: Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler, United States Geological Survey Open-File Report 01-1, 2001

2)深見和彦，菅野裕也，萬矢敦啓：新しいセンサ技術を活用した流量観測データの信頼性向上に関する研究，平成20年度土木研究所成果報告書，独立行政法人土木研究所，2009.3

3)酒井雄弘，二瓶泰雄：ADCPを用いた中書河川の流量計測法に関する検討，水工学論文集，第50巻，2006.2.

4)木下良作：ADCPと無人ラジコンボートで観測される洪水流量とその流れの構造について，農業土木学会平成15年度応用水理研究部会特別講演録，2003.

5)橘田隆史，岡田将治，新井励，下田力，出口恭：ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察，土木学会 河川技術論文集第14巻，2008.6.

6)岡田将治，橘田隆史，森本精郎，増田稔：ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測，水工学論文集，第52巻，2008.3

7)David Mueller: Techniques for Measuring Stream flow with an ADCP in Moving-Bed Conditions, ADCPs in Action 2005.

8)原田靖生，二瓶泰雄，酒井雄弘，水木啓：浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討，水工学論文集，第51巻，2007.2.

9)吉川世里子，岡田将治，橘田隆史，森本精郎：四万十川におけるＡＤＣＰ曳航観測による洪水流量観測と浮子の更正係数の検討，土木学会四国支部，第14回技術研究発表会，講演概要集，2008.5

10)萬矢敦啓，岡田将治，橘田隆史，菅野裕也，深見和彦：高速流におけるADCP観測のための橋上操作艇に関する提案，河川技術論文集，第16巻，2010.6

11)橘田隆史，新井励，南修平，劉炳義：ADCPを応用した河川土砂フラックスのモニタリング手法の研究(Ⅰ)，第41回環境工学研究フォーラム講演集，2004

（2010.7.20受付）

ADCPやH-ADCPによる河川流量観測

RIVER-DISCHARGE MEASUREMENTS WITH ADCP AND H-ADCP

二瓶泰雄[1]
Yasuo NIHEI

[1]正会員　博（工）　東京理科大学准教授　理工学部土木工学科
（〒278-8510　千葉県野田市山崎2641）

Although an ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) has been widely used in flow monitorting in coatasl oceans, there were few applications of ADCP into measuring flow and discharge in rivers several years ago. This paper introduces our attempts to apply an ADCP into discharge measurements in rivers. Discharge measured with the ADCP are used to examine the measuring accuracy for river discharge with floats, showing that the measured discharges obtained with floats have some measuring errors mainly due to treat the velocity profiles in vertical and lateral directions. We also presented a new discharge monitoring system with H-ADCP measurements and numerical simulations.

Key Words : *discharge measurement, ADCP, H-ADCP, float, flood flow*

１．流量観測のきっかけ

筆者は，これまでに河川流量観測に関する研究論文をいくつか発表しているが，まともに流量研究に取り組むようになったのは2003年頃からであり，本報を執筆されている他の先生方と比べるとまだまだ新米である．

筆者は，前の職場（東工大土木）では，灘岡和夫教授のもと，海岸工学・沿岸環境学を専門とし海の流れ・土砂輸送・水環境に関する教育・研究に主に従事していた．ただし，博士論文では「新しい混相乱流 LES の開発」[1)]に取り組み，土木に限らず流体力学を扱う様々な分野（機械や化学工学，原子力等）の研究者と交流していた．また，当時の東工大土木の「水工研」には，灘岡先生の他に，池田駿介先生や神田学先生らが在籍し，輪講を通して流体力学の基礎をみっちり学び，かつ，ゼミなどにより河川や沿岸，大気に関する幅広い研究テーマについて日常的に議論していたおかげで，自分の専門を海岸工学と限定的に捉えていない“つもり”になっていた．

そのため，現在の職場（東京理科大学土木）に2000年4月に異動した後，勤務先（千葉県野田市）が「海から遠い」，「利根川と江戸川に囲まれている」，「富栄養化湖沼（手賀沼や印旛沼）が近くにある」という地理的条件を鑑み，専門フィールドを海から陸に変え，「海（湖沼）」と「陸」をつなぐ陸水環境研究をメインにしようと考えた．これら陸水研究は，博士論文とは全然違うし，元々海の研究をやっていたことを完全に断ち切り一から研究を始めることになるので当然大きな不安やリスクがあったが，前職を経験して，同じ水の研究だから何とかなるかとの楽観的な思いで研究を開始した．

手賀沼等の富栄養化湖沼における水質汚濁化には，流域（陸域）からの過剰な汚濁物質流入が原因の一つとして挙げられていたが，流域から河川を経て湖沼（内湾）に流入する汚濁物質の挙動は非常に複雑でその多くはブラックボックスとなっていた．そのため，2000 年度では，まず手賀沼をターゲットとして，流域全体から湖沼環境を捉えるつもりで水環境研究に取り組み始めた．その際には，流域から河川経由の汚濁物質流入量（汚濁負荷量）を精緻に評価することが最重要ポイントであるので，汚濁負荷量（＝水質濃度×流量）を把握するために，河川における流量観測を実施した．これが流量観測を行うことになったきっかけである．

２．試行錯誤の時期

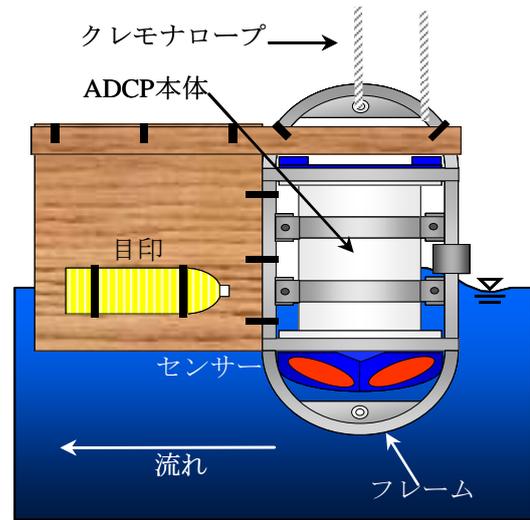
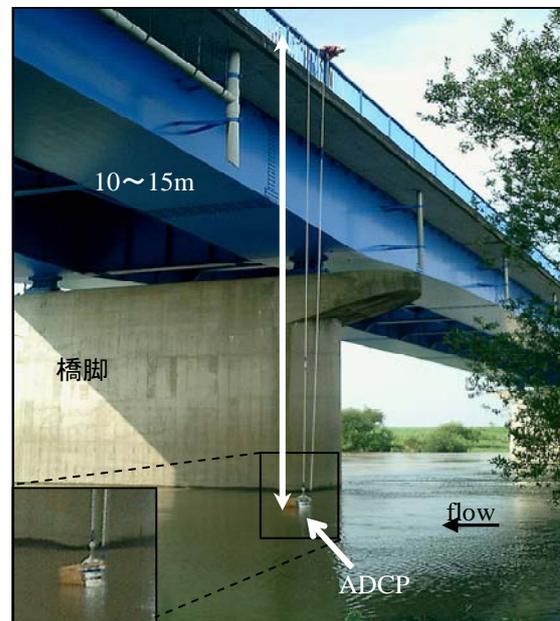
(1) トレーサー（葉）を用いた観測

流量観測を始めた2000年当時はまともな観測機器は無く，競争的資金もほとんど獲得できなかったため，流量観測を行うと言っても流速計一つなかった．そのため，何らかのトレーサ（草や葉等）を流し，それの通過時間を計測して流速を測り，それから流量を換算する，という古典的な方法で観測を行った．特に，汚濁負荷量は出水時データが皆無であったため，雨の中，学生らとともに河川に出掛けて出水時の流量観測や採水調査をよく行った．

(2) ADCPの導入

このような"古典的"な流量観測は精度上問題があり，いつまでも続けるわけにいかないと思い，海岸・海洋分野では一般に普及している超音波ドップラー流速分布計（Acoustic Doppler Current Profiler,, 以下ADCPと呼ぶ）を用いて，河川における流速・流量観測を2003年に初めて試みた．筆者が海岸工学を起点に研究を始めたので，ADCPを使うのは珍しくないと思っていた．しかしながら，当時，河川において本格的なADCP観測を行っていたのは我が国では木下良作先生の研究グループのみであり[2]，世界的に見ても河川工学分野におけるADCPの使用例はそう多くはなかった[3)~5)]．ADCPを用いて流量観測を行うには，ADCPを下向きにして，「水面付近に固定して流速計測し，それを横断面内の複数地点で繰り返し行う」もしくは「ADCPを横断方向に曳航しながら流速計測する」ことにより，横断面内の流速データを取得する必要があるが，当時はADCPの曳航用ボートも市販されておらず，かといって木下良作先生と同じくラジコンボートを自作することは到底出来なかったので，ADCPを水表面付近に浮かべて姿勢を制御できる枠組み（**図−1**）を一部手作りした．そのため，川幅400mにわたり完全に人力のみでADCPを移動させる必要があり，その際には若い学生の腕力のみに頼った．余談だが，東京理科大学のような私立大学では一般に定員が多く，研究室の所属メンバーも学部生のみで10人～20人の大所帯となる．それらの学生の中には，パソコンをいじるのが好きな学生ばかりでなく，外で体を動かすのが好きな体育会系の学生もいるため，後者のタイプの学生には困難な観測遂行上多々助けれられた．

このADCPを用いて，手賀沼流入河川（千葉県・大堀川）や東京湾に注ぐ江戸川・玉葉橋（河口より35km）において洪水時流速・流量観測を行った．そのうち台風0310号出水における江戸川での流速観測結果を取りまとめて2004年の土木学会・水工学講演会で発表したところ[6)]，もの珍しかったためか多くの反響を頂いた．様々な質問のうち，「多量のゴミや流木等が浮遊する洪水時にそんな高価な機器（ADCP）を水面付近に設置して大丈夫か？」や「そもそもADCPは河川流速を正確に測れるのか？」というADCPを用いた観測法に関する疑問が多かった．筆者にとってはそれらの疑問は極めて意外であった．ADCPは海洋観測分野では他の流速計の検証用機器として用いられるほどの信頼性を確立していたが，同じ水でも河川流計測では実績が少なかったため，分野が変わるだけでADCPが"新しい"計測機器として扱われていた．

また，同じ江戸川の観測結果から流量を算出したところ，直近の流量観測所における *H-Q* 式から概算した流量データといくらか異なることが分かった．当時は，河川工学分野で一般に用いられる *H-Q* 式や河川管理者が公表する流量データは絶対的なものであり，計測精度も非常に高いものだと思い込んでいたため，ADCPによる流量推定結果に何らかのミスがあるものだと思い，外部に公表できなかった．そのミスとしては，ADCPの流速計測誤差以外に，離散的な観測点における流速データからの流量算定法に問題があると考えた．そのため，流速データを何らかの形で横断方向に内外挿する手法が必要となり，博士論文等でCFDにのめり込んでいたので数値解析技術をなんとか生かせないかと思い，流速観測値を河川流シミュレーションに導入するデータ同化手法を考案した[7),8)]．この手法を力学的内挿法と呼んでいたが，これが後述する力学的内外挿法[9),10)]の基礎となった．

(a) 模式図

(b) 実際の設置の様子

図−1　ADCPの水面設置用手作り枠組み

(3) ADCPと浮子観測の比較

翌2004年には運よく複数台のADCPを流量観測に用い

ることができる機会に恵まれた．このような貴重な機会を生かすために，単に ADCP による流速・流量観測を行うだけでなく，これまでの洪水流量観測方法の柱である「浮子観測」も同時に行い，両者の結果を比較・検討することを試みた．この比較観測の目的は，2003 年度に露見した「ADCP による流量観測値が *H-Q* 式による流量データと大きくずれた」理由を探るためであり，出水時の *H-Q* 式作成に用いられた浮子流量観測結果に着目したためである．ある大河川の３断面において ADCP 観測と浮子観測を行ったところ，全ての断面で ADCP の流量データは浮子流量よりも小さくなっており，その割合も概ね一致していた．同一の観測方法同士で比べると，連続条件等の整合性は取れているが，複数の観測方法の流量データは一致しておらず，一定の割合で差が生じていた．

これらの結果は，筆者にとっては衝撃的な結果であった．まさか，過去 50 年以上我が国の主要洪水流量観測法として採用されている浮子測法にそれなりの誤差が含まれているとは信じられなかった．ただ，ADCP については前述したように海洋物理分野ではスタンダードな機器と認知されていた [11]．また，過去に浮子観測の計測誤差や計測上の問題点に関して指摘されていたので [12, 13]，浮子測法に何らかの誤差要因が含まれているものと考え，これらの観測結果を研究報告会等で口頭発表した．その結果は惨憺たるもので，「ADCP の観測結果は正しいのか？」や「浮子観測結果にも誤差はあるが，誤差の基準となる流量の真値が存在しない」というものから，「既存の文献をちゃんと調べているのか」といった趣旨のことまで言われた．「他の研究者から自分の研究を批判されたらしめたと思え」との趣旨を神田先生が書かれていたが [14]，上記のものは「批判」というレベルを大きく超えたものだった．

このように，専門分野や対象フィールドが異なるだけで ADCP データの評価が 180 度変わるとは予想もしていなかったので，本腰を入れて流量観測研究をやらねばと決意した．その際には，次の 3 点に着目して，流量観測研究を行った．

① 河川における ADCP 計測精度の検証
② 更正係数や流量算出法に着目した浮子観測の流量計測精度の検討
③ H-ADCP による新しい流量連続モニタリングシステムの構築

以下では，各研究成果の一部を紹介する．

３．河川における ADCP 計測精度の検証 [15]

(1) 調査方法の概要

様々な河川流量観測法が用いられているが，それら相互の精度検証をする時に，必ず「河川流量の真値はどれだ？」という話になる．例えば，低水時では，プライス流速計や電磁流速計等の「点」流速計を用いて，計測点を空間的に十分細かく設定でき，横断面内全体の流速分布を詳細に取得しえるので，それらの結果は「流量の真値」に限りなく近くものと見なされる．すなわち，時間と労力を十分掛けて良い低水時ならば流量観測精度について心配する必要はない．ところが，時間的な変化が大きい洪水時の場合や，もしくは川幅が数百 m～1 km 程度の大河川の場合には，点流速計を用いて十分な空間解像度を有した計測点を設定することが困難である．このような状況下では，効率的でかつ計測精度が高い ADCP が有力な手法となると考えられるが，前述したように，河川工学では ADCP の計測精度に疑念を持たれていた．そのため，ADCP による流量観測の計測精度について検証を行う必要があり，これを行わないと後述する浮子流量観測の計測精度の実態解明や新たな流量モニタリング手法開発に必要となる検証用データが無くなってしまう．

そこで，ADCP による河川流量観測法を確立・標準化することを目的とし，低水時・洪水時の流量観測を実施し，ADCP を用いた河川流量計測法の流量計測精度やその手順

(a) 模式図

(b) 実際の様子（江戸川・野田橋）

図－2　ADCP 移動観測法の概要

について検討した[15]．瞬時に流速鉛直分布が計測可能であるという ADCP の特徴を生かしつつ，特殊技能を持たなくても ADCP を移動させる可能となるように，**図−2** に示すような ADCP 移動観測法を実施した．ここでは，ADCPを鉛直下向きにした形で専用浮体（Riverboat, Teledyne RDI 製）に取り付け，それを水面付近に浮かべて橋上より横断方向に移動させる．ここでは，ADCP により各横断位置における流速鉛直分布と水深を計測し，また同時に目視で ADCP の横断位置を記録することにより，横断面全体の流速と水深分布データを取得し，最終的に流量を算定する．ADCP の移動手段としては，橋上からロープ等で移動させるという簡便な方法とする．専用浮体の大きさは 1.2m×0.8m とコンパクトであり，低水時のみならず出水時においても，専用浮体をわずか 1 人で引っ張ることにそれほど労力を必要としない．

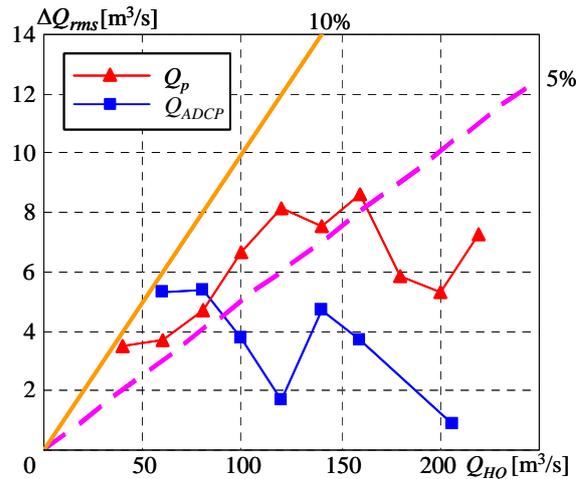
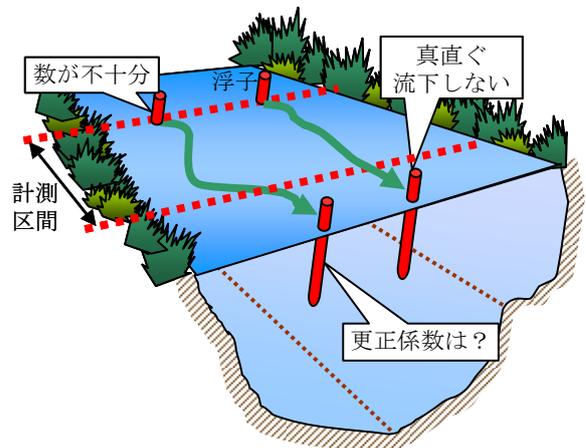
また，ADCP の流量観測精度を考える際には，データ取得してから流量を求めるまでの後処理が極めて重要であり，特に，ADCP の未計測エリアとなる水表面・底面，側岸付近における流速補間操作がキーとなる．その手順の詳細は，筆者の文献[15]を参照されたい．

(2) 観測結果の一例

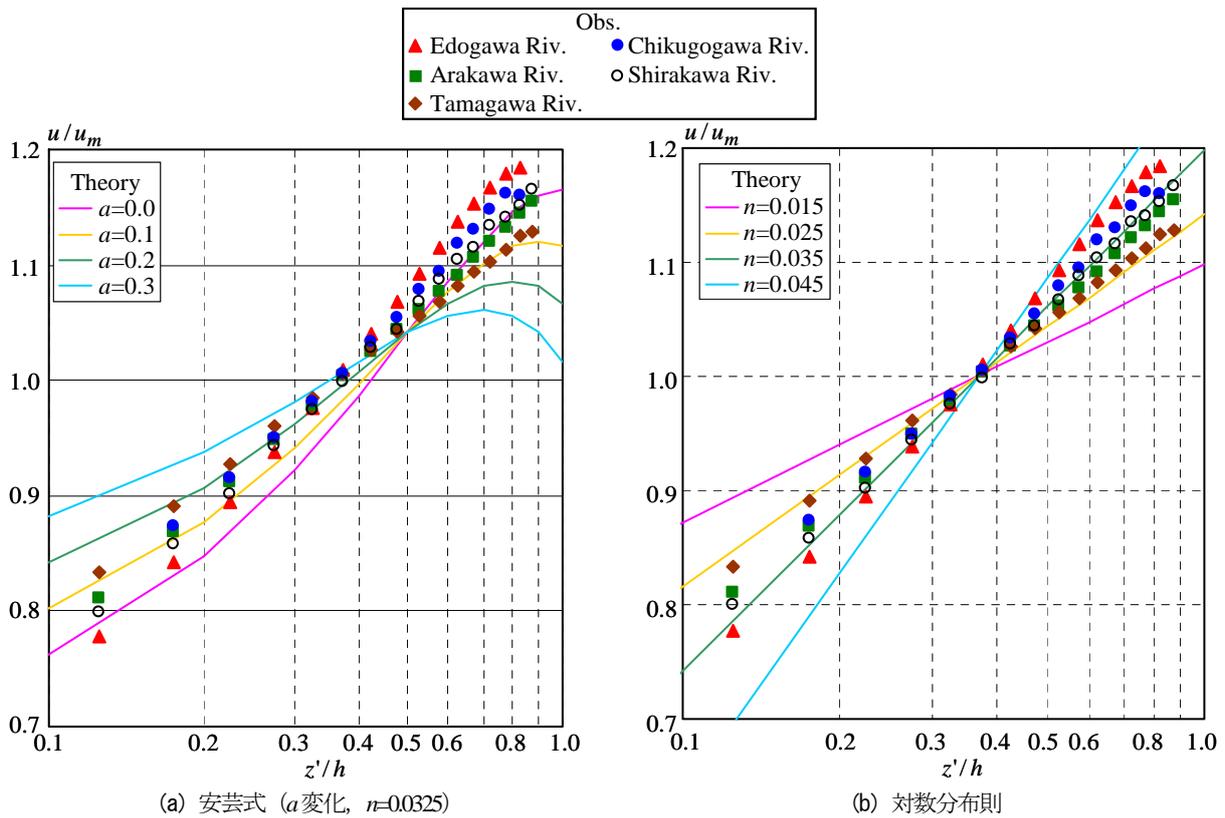
表−1 は，ADCP による流速，水深，目視による横断位置及び流量に関する計測誤差の平均値と RMS 値が示されている．これらの結果は主として江戸川・野田橋で低水時にて行われた．これより，本観測法による流速，水深，横断位置，流量の計測精度は，既存手法と比べてそれほど遜色ないことが分かる．

詳細に流量計測精度を調べるために，既存研究[16]と同様に，ADCP による流量観測値 Q_{ADCP} と H-Q 式による基準値 Q_{HQ} の差の RMS 値 ΔQ_{rms} を**図−3** に示す．ここでは誤差の RMS 値 ΔQ_{rms} の流量依存性を見るために，図の横軸を流量 Q_{HQ} とし，流量を 20m^3/s 毎もしくはそれ以上の範囲に区分けし，各流量範囲内において求められた ΔQ_{rms} が図示されている．また，参考のために，プライス流速計による流量観測値 Q_p に関して算出した誤差の RMS 値 ΔQ_{rms} も表示している．これより，ADCP 移動観測法における ΔQ_{rms} はどの流量においても 6m^3/s以下に収まっており，また，流量が増加すると ΔQ_{rms} が小さくなる．これらの結果を相対誤差に換算すると，全て流量において，相対誤差は 10%を下回っている．また，Q_{HQ} < 100m^3/s では相対誤差が 5%以上となるのに対して，Q_{HQ} > 100m^3/s では相対誤差が 5%以下である．一方，プライス流速計の結果に対する ΔQ_{rms} は，最大で 8.6m^3/s であり，相対誤差で見ると概ね 5%強である．両結果を比べると，流量 100m^3/s 未満ではプライス流速計の誤差値の方が ADCP 移動観測法の値よりも小さいものの，流量 100m^3/s 以上ではその逆の大小関係になっている．

表−1 各項目の計測誤差の平均値と RMS 値（RMS : Root Mean Square, n : データ数）

	Value		Percentage [%]		n
	Mean	RMS	Mean	RMS	
Velocity [m/s]	-0.024	0.036	-4.18	6.93	23
Depth [m]	-0.031	0.114	-1.13	9.18	123
Lateral position [m]	-0.256	0.950	-0.36	2.13	91
Discharge [m^3/s]	-2.18	4.48	-3.63	6.20	36

図−3 流量誤差の RMS 値 ΔQ_{rms} と流量の関係（図中の点線と実線は観測誤差 5，10%を示す）

図−4 浮子観測の概要と問題点

以上のことより，ADCP 移動観測法がプライス流速計と同程度に精度良く流量計測を実現しており，流量が相対的に大きくなるほどその精度は向上することが示された．なお，流量が相対的に小さい場合には水深が浅くなるため，ADCP 移動観測法では流速計測可能なエリアが相対的に減少するとともに，測深誤差が増加する．その結果として，低流量条件では，ADCP 移動観測法の計測誤差が増

(a) 安芸式（a変化，n=0.0325） (b) 対数分布則

図−5 各河川における無次元流速鉛直分布に関する観測データの平均値と理論値の比較（n : m-s単位）

大するものと考えられる．また，ここでの流量計測精度の検証は低水時のみに限定されているが，水表面におけるADCPの姿勢を安定して保つことが可能な流況ならば，洪水時においても ADCP 移動観測法の流量計測精度はここで示した結果と同程度になるものと推察される．

4．浮子流量観測の精度検証[17)~19)]

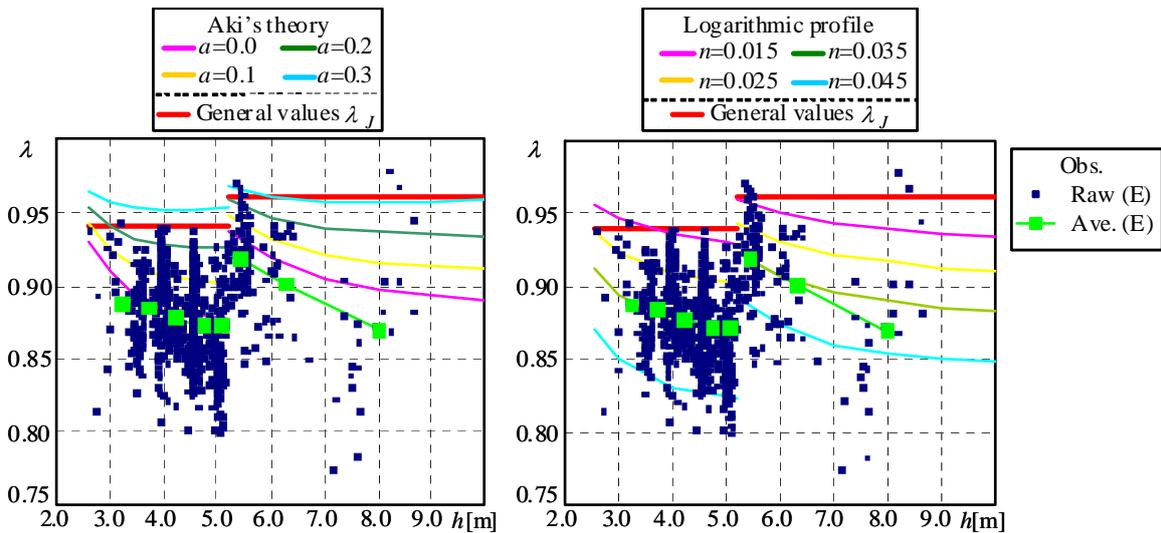
(1) 概要

前節で示したように，ADCP流量観測法の計測精度が良好であることが確認できたので，このADCP観測結果を基準データとして，浮子流量観測の計測精度を検証した．浮子流量観測の問題点としては，**図−4**に示すように，①浮子が流下方向に真直ぐ流れない等の流速計測値自体の問題と，②更正係数（=水深平均流速／浮子表層流速）の妥当性の検証例が少ない，③浮子の数が少ないために十分な流速横断分布が得られない，という流量推定上の問題が指摘されている[12), 13)]．そのため，以下では，更正係数について詳細に検討した結果を紹介し[17), 18)]，浮子流速データから流量推定方法の検討結果についても示す[19)]．

(2) 更正係数

実河川における浮子の更正係数の実測値を得るために，ADCPによる流速鉛直分布データから更正係数を算出する．ADCPデータとしては，江戸川，荒川，多摩川，筑後川，白川における観測結果であり，これらの中にはADCPを水面設置した場合と底面設置した場合がある．また，ADCPのみならず，Aquadopp（Nortek AS製）による計測値もデータ解析に使用されている．ここでは合計3500を越える流速鉛直分布データを収集し，解析に用いた．

結果の一例として，各河川における流速鉛直分布の観測データの平均値と理論値を比べたものを**図−5** に示す．ここでは無次元流速u/u_m と無次元高さ z'/h の形で表示されている（u : 主流方向流速，u_m : 水深平均流速，z' : 底面からの高さ，h : 水深）．また，理論値としては，更正係数算定に用いられる安芸式（最大流速相対深度 a=0〜0.3，マニングの粗度係数 n=0.0325 $m^{-1/3}s$）[20)] と対数分布則（n=0.015〜0.045 $m^{-1/3}s$）の結果を図示している．これより，安芸式の場合には，観測データは上層では a=0 か 0.1，下層では a=0.1 か 0.2 の理論値と類似したパターンとなっているが，水深全体にわたりよく適合する流速ピークの相対水深 a は存在しない．それに対して，4種類のマニングの粗度係数 n を設定した対数分布則の場合には，全河川の観測データは水深全体にわたり理論値と概ね一致しており，特に n=0.025〜0.035 $m^{-1/3}s$ の理論値の適合度が高い．このように，流速鉛直分布に関する観測平均値は，安芸式よりも対数分布則との一致度合いが高いことが確認された．

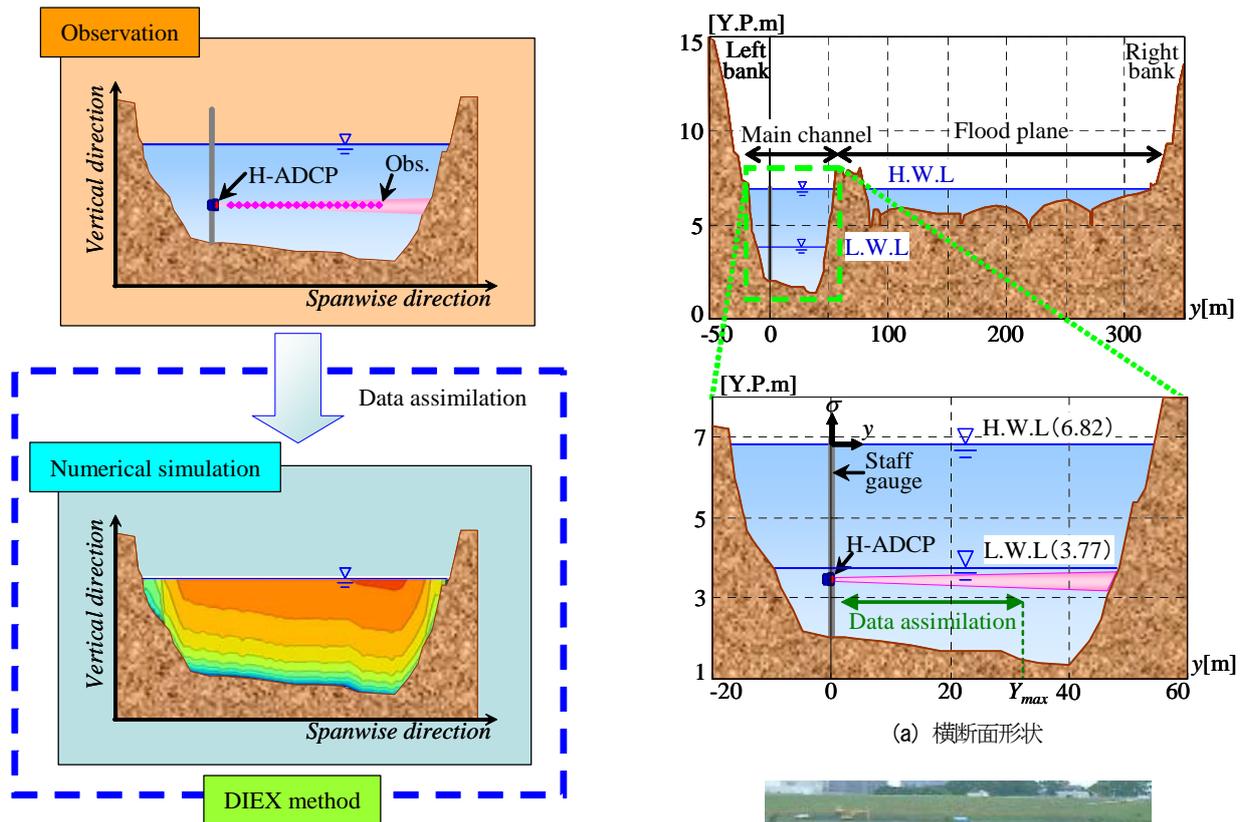
更正係数の観測値に対する理論値の整合性を検討するために，各水深における更正係数の観測値と理論値を**図−6** に示す．ここでは多くの観測データが収集された表層

図−6 表層2m及び表層4m流速に対する更正係数の観測値と標準値λ_J，理論値の比較（理論値として安芸式（左図，n=一定）と対数分布則（右図）を示す．観測値としては江戸川における生データと移動平均値を示す）

2m・4m流速の更正係数を対象とし，水深h=2.6〜5.2mと5.2〜10mにおいてそれぞれ表層2m，4m流速の更正係数を表示している．理論値としては，安芸式（n=0.0325 m$^{-1/3}$s，a=0〜0.3）と対数分布則（n=0.015〜0.045 m$^{-1/3}$s）の結果を図示している．また，観測値としては，生データに加えて，水深0.2〜0.5m毎に適当に区分けされた範囲における更正係数の移動平均値を表示し（対象：江戸川のみ），我が国の標準値λ_Jも合わせて図示している．これより，観測データの移動平均値は我が国の標準値を下回っており，その差は水深と共に広がる．例えば標準値が0.96である表層4m流速の更正係数に関しては，移動平均値は0.87〜0.92となり，標準値λ_Jを0.04〜0.10も下回る．理論値と観測値を比べると，流速鉛直分布と同様に，安芸式よりも対数分布則の方が観測値と一致している様子が分かる．このように，浮子流量観測において用いられる更正係数にはある一定の誤差が含まれている．

図−7 浮子流量（Case1）と修正流量（Case2）及びADCP観測流量に関する相関図

(3) 浮子観測の流量推定法の検討

浮子観測における流量推定手順に着目し，流速鉛直分布（更正係数）と流速横断分布の扱いについて検討した．前者の更正係数については，前節で述べたとおり，我が国の標準値（浮子長2m, 4mの場合各々0.94, 0.96）はADCPによる観測値を上回っている．ここでは簡易に更正係数を設定するために，実測値の平均値として，浮子長2mには0.87，浮子長4mには0.90の更正係数を与えた．一方，流速横断分布については，横断面内の測定点数が不十分な浮子データは，横断方向に大きく変化する流速分布を正確に計測できず，流量の推定誤差が増加するものと考えられる．そこで，疎らな観測点における流速データを力学条件を満たした形で内挿し，精度良く流速横断分布や流量を推定することが可能な平面二次元河川流解析法である力学的内挿法[7, 8]を導入する．本節では，浮子観測データを用いてこれまでの流量推定手順による結果（浮子流量，Case1）に加えて，ここで示した力学的内挿法と更正係数の実測値を用いて浮子観測データを修正して得られた結果（修正流量，Case2）について，ADCP移動観測結果と比較する．

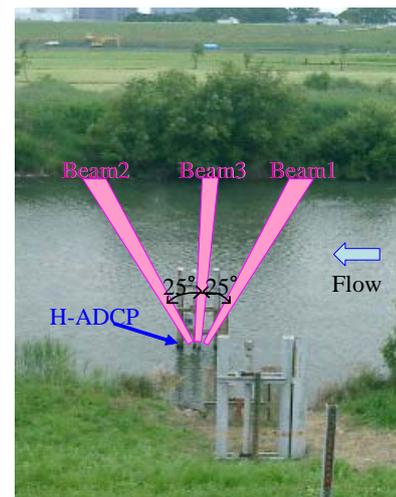
Case1と2における流量推定精度を定量的に検証するために，浮子流量（Case1）及び修正流量（Case2）とADCPによる流量観測結果の相関図を**図−7**に示す．図中には，ADCP観測値に対して5，10，20，30%の誤差に相当する直線を引いている．これより，浮子流量（Case1）については，ADCP観測結果とのずれが大きく，誤差10〜30%あたりに分布している．一方，修正流量（Case2）に関しては，浮子流量（Case1）よりも誤差が減少し，誤差10%の直線周囲に分布している．両ケースにおける相対誤差

図—8　本流量モニタリング手法の基本構成

の平均値はCase1で20.9%，Case2は7.5%となり，ここで示している二つの修正点を加えることにより13.4%の誤差を低減していることが分かる．この内訳としては，更正係数の実測値を用いたことによる効果は約7%であり，力学的内挿法による流速横断分布の修正による効果が約6%である．浮子流量観測における流量計測精度を向上させる上では，更正係数の実測値導入と力学的内挿法による流速横断分布の推定は有用であることが示された．

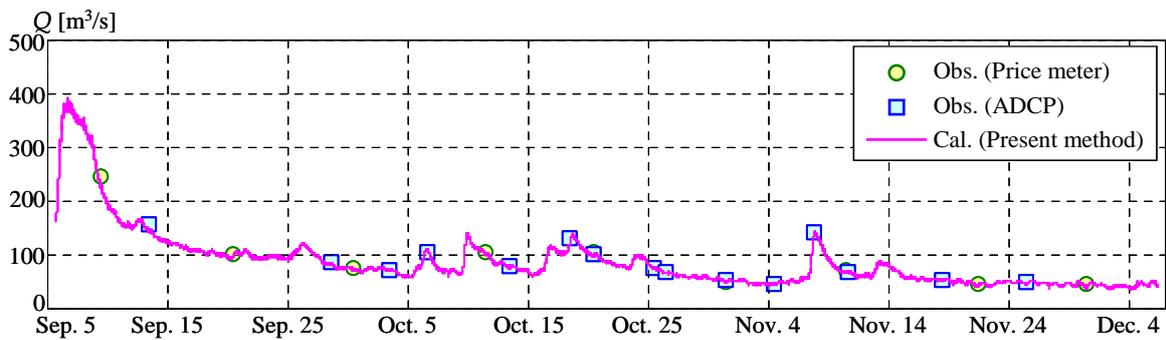
5．H-ADCPによる新しい流量連続モニタリングシステムの構築[9, 10]

(1) 概要

上記のADCP観測や浮子観測は，現地河川に出掛けて行う「単発観測」であり，これらのデータから*H-Q*式を作成し，流量の連続データをモニタリングしている．このような「間接」流量観測法では適用精度や範囲に限界があるので，近年著しく発展している流速計測技術に基づく「直接」流量モニタリング手法の開発が求められるが，現状で横断面全体の流速分布計測を可能とする測定器は存在しない．そこで，流速計測技術を生かしつつ，適切な方法により観測値を補間する「準直接」流量モニタリング技術の開発が強く求められている．そこで，わずか一台で流速横断分布計測が可能な水平設置型超音波ドップラー流速分布計H-ADCP（Teledyne RDI製）による

(a) 横断面形状

(b) 様子

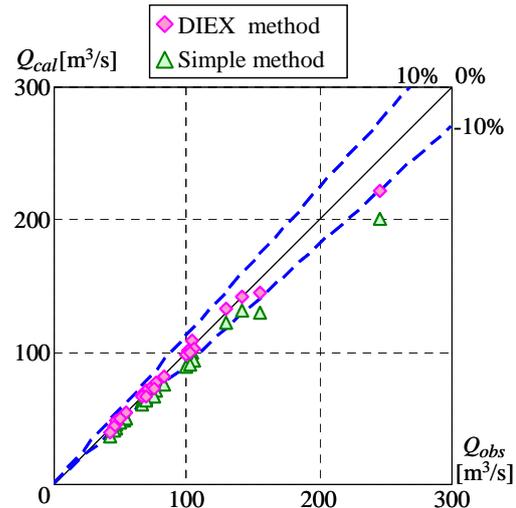
図—9　H-ADCPの設置状況（江戸川・野田橋）

観測技術と最新の河川流シミュレーション技術を融合して，低コストで高精度な自動流量モニタリングシステムを新たに開発した．ここでは，図—8に示すように，H-ADCPにより流速横断分布を計測して，得られた流速の「線」データを取り込んだ河川流シミュレーションを行い，流速の「面」データや流量を算定する．データ同化手法を組み込んだ河川流モデルとして，流体力学条件を満たした上で横断面内における流速の内外挿操作を実施する**力学的内外挿法**（Dynamic Interpolation and EXtrapolation method，以下，**DIEX法**と呼ぶ）を開発した．このH-ADCP 600kHzを江戸川・野田橋付近に2005年から設置している．設置の様子は図—9のとおりである．

図−10　全観測期間中における流量の時系列変化

⑵ 結果

本手法による流量推定精度を検証するために，ある観測期間中における流量の時系列変化を**図−10** に示す．ここでは， DIEX 法による計算結果とプライス流速計及び ADCP による観測結果をそれぞれ図示している．これを見ると，本手法による流量推定値はプライス流速計や ADCP による流量の実測値と良好に一致している様子がうかがえる．本手法による流量の算定精度をより詳細に検討するために，流量の観測結果Q_{obs}と計算結果Q_{cal}の相関図を**図−11** に示す．ここでは， DIEX 法による計算結果に加えて，単純法（観測データを直線で補間する手法）による推定結果も図示する．図中には流量推定値の誤差が分かるようにするために，誤差 0，±10%に相当する直線（実線，点線）も表示している．これを見ると，DIEX 法の計算結果は観測値と類似しており，全て誤差±10%以内となっている．それに対して，単純法による計算結果は，DIEX 法の結果よりも観測値との差が大きく，±10%の誤差を上回る結果が多く見られる．また，単純法の流量推定値は全体的に観測値よりも小さい．これは流速の内外挿を行う部分において流速を過小評価しているためである．このように，DIEX法は流量を精度良く推定しており，その相対誤差の RMS 値は 4%以下となり，力学条件を考慮しない単純法の場合よりも十分低く，本流量モニタリング手法の有効性が示された．なお，ここでは，低水時のデータのみ示したが，出水時や感潮域においてもほぼ同様な結果を得ており，本システムの汎用性・適用性は幅広いものと考えている[21, 22]．

6．おわりに

本報では，河川では比較的少なかった ADCP による流量観測を始めた経緯や観測方法，計測精度について示した．また，その ADCP データを基準として，浮子観測法の計測精度やその改善策を提示するとともに，H-ADCP 計測技術と数値解析技術を融合した新しい流量連続モニタリングシステムを構築した結果の一例を紹介した．

図−11　流量の観測結果Q_{obs}と計算結果Q_{cal}の比較（図中の実線，点線は推定結果の誤差 0，±10%を示す）

昨年度より国土交通省では ADCP による流量観測法導入の検討を本格的に開始しており，筆者が研究を始めた時と比べると隔世の感がある．河川流量データは，河川管理上の最重要データの一つであり，品質管理は極めて重要である．そのため，より慎重な流量データ管理を行う必要があり，過去からの連続性に縛られ最新の計測技術の導入が見送られるのは問題がある．その点，我が国における最近の ADCP 観測法導入の動きは画期的なものであると考えられる．また，筆者の流量研究も，細々とではあるが続けるつもりであり，国内外の流量観測技術発展の一助となるような研究成果を上げられるように鋭意努力する予定である．

なお，本報で紹介した研究成果は，関係する河川管理者の皆様からの観測実施への協力やデータ提供をして頂けたおかげである．また，大変な観測作業や膨大なデータ整理には，東京理科大学理工学部土木工学科水理研究室の卒業生の惜しみないご協力のおかげである．特に，故木水啓氏，酒井雄弘氏，原田靖生氏，色川有氏には大変お世話になった．ここに感謝の意を表します．

参考文献

1)　二瓶泰雄：新しい計算手法に基づく混相乱流 LES の開発と

複雑混相乱流解析への応用, 東京工業大学学位論文, pp.1-185, 1999.
2) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する－提案, 水文・水資源学会誌, Vol.11, No.5, pp.460-471, 1998..
3) Lipscomb, S. W.: Quality assurance plan for discharge measurements using broadband acoustic Doppler current profilers, U. S. Geological Survey Open-File Report 95-701, 1995.
4) Mueller, D. S.: Field assessment of acoustic-Doppler based discharge measurements, *Proc. Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, ASCE, 2002 (CD-ROM).
5) Oberg, K.: In search of easy-to-use methods for calibrating ADCP's for velocity and discharge measurements, *Proc. Hydraulic Measurements and Experimental Methods*, ASCE, 2002 (CD-ROM).
6) 佐藤慶太・二瓶泰雄・木水啓・飯田裕介：洪水流観測への高解像度超音波ドップラー流速分布計の適用　～江戸川を例にして～, 土木学会水工学論文集, Vol.48, No.1, pp.763-768, 2004.
7) 二瓶泰雄, 木水啓：新しいデータ同化手法に基づく河川流速・流量推定法の提案, 土木学会論文集 Vol..803／II-73, pp.155-160, 2005.
8) Yasuo Nihei and Akira Kimizu: Evaluation of River Velocity and Discharge with A New Assimilated Method, *Journal of River Basin Management*, Vol.4, No.1, pp.27-30, 2006.
9) 二瓶泰雄・木水啓：H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築, 土木学会論文集 B, Vol.64, No.4, pp. 295-310, 2007.
10) Nihei, Y. and Kimizu, A. : A new monitoring system for river discharge with H-ADCP measurements and river-flow simulation, *Water Resources Research*, Vol.44, W00D20, doi:10.1029/2008WR006970, 2008.
11) 金子新, 伊東集通：ADCP の普及と海洋学の発展, 海の研究, Vol.3, No.5, pp.359-372, 1994.
12) 山口高志：洪水流速および流量観測　－その１－, 水文・水資源学会誌, Vol..15, No.6, pp.625-635, 2002.
13) 深見和彦, 天羽淳, 大手方如, 吉谷純一：流量観測に関する技術基準と新しい技術開発への対応, 土木技術資料, Vol..45, No.2, pp.22-29, 2003.
14) 神田学：学術賞を受賞して, 水文・水資源学会誌, Vol.17, No.2, pp.117, 2004.
15) 二瓶泰雄・色川有・井出恭平・高村智之：超音波ドップラー流速分布計を用いた河川流量計測法に関する検討, 土木学会論文集 B, Vol.64, No.2, pp.99-114, 2008.
16) 今村仁紀, 深見和彦, 天羽淳：河川における低水流量観測技術基準の再評価, 土木技術資料, Vol.48, No.1, pp.66-71, 2006.
17) 酒井雄弘, 二瓶泰雄：ADCP データに基づく大河川洪水流の更正係数に関する検討, 水工学論文集, Vol.51, pp.733-738, 2007.
18) 二瓶泰雄, 酒井雄弘：実河川洪水流における浮子の更正係数, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.2, pp.104-118, 2010.
19) 原田靖生・二瓶泰雄・酒井雄弘・木水啓：浮子観測の洪水流量計測精度に関する基礎的検討, 水工学論文集, Vol.51, pp.1081-1086, 2007.
20) 安芸皓一：浮子特に竿浮子による観測流速の更正係数に就いて, 土木学会誌, Vol..18, No.1, pp.105-129, 1932.
21) 木水啓・二瓶泰雄・北山秀飛：H-ADCP と DIEX 法を用いた河川流量計測法の洪水流観測への適用, 水工学論文集, Vol.51, pp.1057-1062, 2007.
22) 原田靖生・二瓶泰雄・北山秀飛・高崎忠勝：H-ADCP 計測と数値計算に基づく感潮域の河川流量モニタリング　～隅田川を例として～, 水工学論文集, Vol.52, pp.943-948, 2008.

(2010. 7. 20 受付)

ADCPを搭載した橋上操作艇による洪水流観測技術の進展

DEVELOPMENT OF FLOOD FLOW OBSERVATION TECHNOLOGIES USING TETHERED BOAT EQUIPPED WITH ADCP

岡田 将治[1]
Shoji OKADA

[1]正会員 博士(工学) 高知高専 准教授 環境都市デザイン工学科（〒783-8508 高知県南国市物部乙200-1）

To have a better understanding of ADCP instruments and develop a system for the highly accurate measurement related to water discharge, velocity profiles and bathymetries, authors focus attention on a build-in inclination sensor in ADCP, which is a liquid-surface-detection type. The field measurement with a floating vessel in Japan involves high velocity and vibration of water surface, which might induce the major sources of error related to a vessel fluctuation. Therefore, in this paper, authors quantitatively evaluate the influence of vessel fluctuation on ADCP measurement with 1) developing a measurement system with employing an MEMS inclination sensor, 2) conducting experiments in an experimental pool with the system, and 3) conducting the field measurement. The authors find out characteristics of the build-in inclination sensor of ADCP, apply the knowledge to actual discharge measurements, evaluate the systematical measurement error, and introduce the possible solution for eliminating missing values.

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, Evaluation index of river flow measurement, Vessel fluctuation, Inclination sensor*

1. はじめに

数年前まで浮子観測以外で洪水流量を計測することは困難と考えられてきたが，近年，洪水観測技術を大きく向上させるよな機器や計測技術の開発，それを活用した観測事例も多く紹介されるようになり，条件さえ整えば，洪水時においても詳細な流速分布や河床形状を計測できるという認識に変わりつつある．特に，ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers)は3次元流速分布と河床形状を計測できる有効な手法として，研究者，実務者を問わず幅広く活用されている．海外においては，米国のUSGSを中心としてADCPを用いた計測技術やデータに関する精度検証技術[1), 2)]を構築しており，計測技術およびデータ品質管理についてはほぼ確立している．一方，日本国内においては，同様な検討がなされておらず，ADCPが普及し始めた初期の段階では，現場の流況に応じて計測条件の設定や計測データを処理できる技術者が少なかったため，不慣れな観測者が条件を適当に設定して，十分なデータが取得できないという状況も度々あったようである．さらに，ADCPの計測設定条件や計測手法に応じて計測データの精度，すなわち計測値に含まれる誤差分の標準偏差(筆者らが後に偏差流速と定義)が異なることが知られておらず，観測者も発注者側もADCPで計測したデータはすべて同様の精度を有すると誤って認識している場合が多い．

筆者らは，ADCPの有用性や今後の発展性を認識したうえで，河川の流量観測の一手法として早急に技術の標準化を進めるため，その基礎となる計測手法に加えてデータ処理および観測データの品質管理を行うための精度評価の3つの技術検討を進めてきた．特に，国内におけるADCPを用いた河川流況計測は，高流速で水面が大きく変動する流れ場の横断面流量計測にとどまらず，河川構造物や樹木群周辺の流れ場の計測等への応用観測等へのニーズも高まっていることから，ADCPの移動観測についてはUSGSが提案する手法をそのまま取り入れるのではなく，わが国の河道特性，流況特性に対応できる日本独自の技術の確立が重要と考えた．

本稿では，著者らがこれまでに検討を進め，現在実務レベルで多く活用されているADCPを搭載した橋上操作ボートを用いた洪水流の移動観測技術について，データ処理法や計測精度評価技術についてまとめる．さらに洪水流観測を想定して，ボートが傾斜・揺動がADCPの水深および流速計測値に及ぼす影響に関する詳細な検証事例を紹介する．

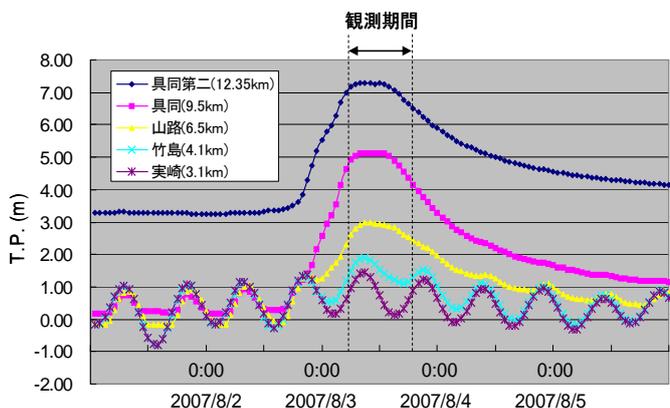



図-1 四万十川における2007年台風5号接近・通過時の水位ハイドログラフ(2007年8/1～8/6)

図-2 ADCPを搭載する橋上操作艇の計測状況

図-3 2007年台風5号出水時の四万十川具同地点の流況

表-1 ADCPの計測設定条件

計測モード	12(ハイスピード)
計測層厚	0.25m
計測層数	60層
1アンサンブル時間	4sec
ウォーターピング数	10ping
ボトムトラック機能	ON
固定観測における流速計測誤差の標準偏差	4.31cm/s

2. 橋上操作艇によるADCP洪水観測技術の構築

(1) 四万十川におけるADCP橋上曳航観測

四万十川具同地点における流量観測精度向上を目的として，管理者である国土交通省中村河川国道事務所と高知高専が共同で2007年度から検討を進めている．その一環として，2007年の台風5号襲来時にADCP搭載橋上操作艇を用いて洪水流量観測を行った．

図-1に示す全長1.22 m，全幅0.81 m，重量6 kgの高密度ポリエチレン樹脂製の小型軽量ボートを使用した．この橋上操作艇は，USGSのMichaelら[6]が行った実験結果に基づいて開発され，USGSの河川流量観測用標準橋上操作艇としても採用されており，現在世界中で最も多く利用されているものである．**図-2**に2007年台風5号接近・通過時の四万十川の各水位観測所の水位ハイドログラフを，**図-3**に観測時の四万十川具同地点(河口から9.5km)の状況を示す．具同地点の水位は8月2日20:00頃から上昇し始めたため，観測はボートを曳航する際の安全性を考慮して翌3日6:00から開始し，同日18:00まで12時間行った．ピーク水位は，具同水位標で8:00(H=3.89 m)から13:00(H=3.88 m)まで3.90 m程度であった．前月に起きた台風4号による出水ではピーク水位が8.32 m(7/15 3:00)であったこと，水防団待機水位が5.00 mであることから，この出水は具同地点においては小規模洪水に位置づけられる．また，観測期間における具同第2，具同および山路の各地点の水位データから水面勾配を求めると，1/1300から1/1400程度であったことから，ほぼ同じ水理条件の下で計測が行われたといえる．ADCPの計測条件は，**表-1**に示すようにウォーターピング（流速分布を計測するために発射する超音波）数を10，計測層厚0.25 m，計測層数60層とし，対地速度を計測するボトムトラックはONとした．以上の計測設定条件から，固定観測を行う場合の理論上の流速計測値に含まれる誤差の標準偏差は4.31 cm/sとなる．この値が次章で示すADCPで計測したデータの精度評価法に大きく関係する．

ADCPを搭載したボートに80 mのロープを結び，四万十川橋下流側歩道から約10 m下の水面に降ろし，橋から約50 m下流にある浮子観測に用いる第1見通し線上付近を通るように横断方向に移動しながら計測を行った．観測期間中の水面幅は約300 mであり，1回(片道)の計測に要する時間は約15分間で，2回(往復)の計測を1セットして，1時間隔で1セットを行った．洪水流観測で使用した橋上操作ボートにもハイドロシステム開発社製のデータ転送システム(Remo ADCP)を搭載しており，各時間の流速分布，河床形状，流量の計測状況をその都度確認しながら行うことができる．

(2) 航跡が蛇行する場合の航跡直線化手法の適用

流況計測を行った具同地点のように，直上流の河道内に橋脚が多く設置されている場合には，後流の影響を大きく受け，橋上操作艇を直線的に曳航させることが難しい．そのため，**図-4**に示す流速ベクトルに示すように，順流域と逆流域が交互に現れる右岸側の主流部では，ボートの転覆を極力回避するため，流れに逆らわずに蛇

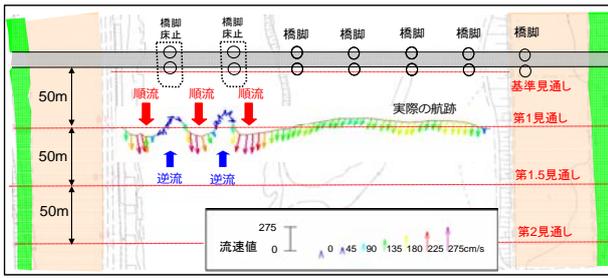



図-4 橋上操作艇の航跡と水深平均流速ベクトル

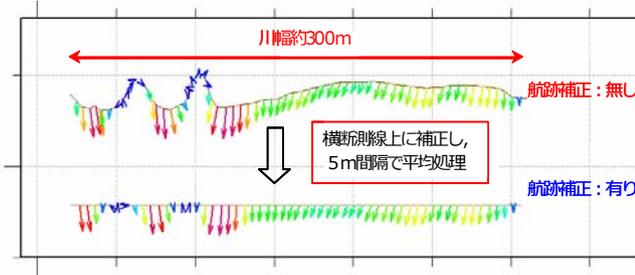



図-5 航跡補正前後の水深平均流速ベクトル

行させながら横断方向に計測せざるを得ない．

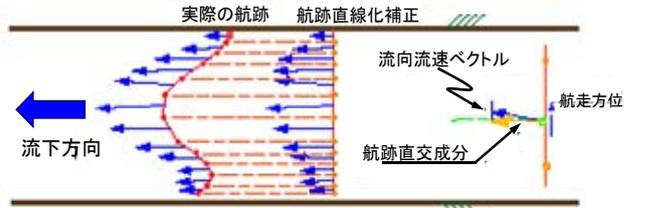
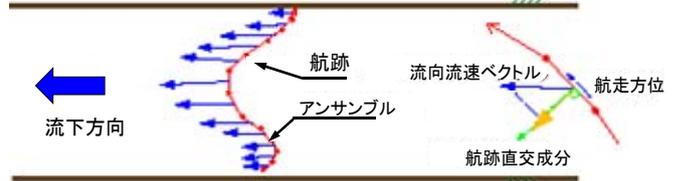
Telrdyne RDI社のADCPに付属する計測データ描画ソフト(WinADCP)では，航跡が蛇行する場合でも，ADCP内部の磁気コンパスとボトムトラッキング機能により，進行方向に対して垂直方向の流速成分を算出するため，断面内の流量値の算出は可能である．しかし，河床形状，流速分布については**図-5上図**のような航跡に沿った形状となることから，本研究では浮子観測や今後普及していくと考えられる固定観測式H-ADCP等，横断方向に直線的に計測されたデータとの比較ができるように，示した蛇行して計測した場合の航路，流速分布および河床形状を直線化する補正を行った．本観測で計測した断面の水面幅は約300mであったが，航跡に沿った移動距離は蛇行したことで約340mとなり，実際の水面幅より約40m長くなる．そこで，これらの計測データを5m間隔で平均化処理し，航跡を横断測線に沿って投影補正を行い，**図-5下図**が得られた．5m区間に含まれる計測データ数はボートの移動速度によって異なり，1-10個であった．つぎに，流下軸方向への直線化補正の妥当性を検証するために，ADCPの計測データ処理ソフトWinRiver(TRDI社)，航跡直線化補正後流速および航跡直交成分流速を用いた断面流量換算値を比較した．流速の算出方法は**図-6**に示す．その結果，**表-2**に示すように，平水時および洪水時においても，換算流量値に有意な違いは見られず，流量値の差は最大1.3%であった．この流量差の原因は，河床付近の流速値の補完方法に起因するものであったが，断面内の流量値に影響するものではないことがわかった．したがって，補完法の違いによる有意な差はなく，浮子観測やH-ADCP等との比較を行うために航跡の直線化補正を行っても差し支えないことが明らかとなった．

航跡直交成分の抽出方法

図-6 航跡直線化による流下軸成分および航跡直交成分の流速抽出方法

表-2 航跡補正による算出流量の比較

流量算出方法と流量値(m^3/s)		
WinRiver (TRDI 社)	航跡直交成分	航跡直線化
1942	1922	1915
2006	2029	2037
1956	1906	1900

(3) ADCPによって観測された具同地点流量

図-7に補正されたADCP横断流速分布，河床形状および断面流量を示す．全断面を計測できずに途中で転覆したケースについては，断面流量換算ができないため，ここでは省略している．流量値の算出に際しては，水面付近の約50cmの未計測エリアは水面近傍の計測データを用いて外挿補間を行い，河床付近の未計測エリア(約50cm)については，河床の移動速度をゼロと仮定して線形補間している．また，河床変動が大きい際に見られる河床の滑りについては，600kHzタイプのADCPを使用したこと，出水が小規模のものであったことから確認されていない．各時刻の流速分布を比較すると，順流と逆流の生じている区間がはっきりと確認でき，同じ箇所で同程度の流速が生じている．10時から14時の時間帯で水理条件がほとんど変化していないことからも，これらの時間帯の流れはほぼ定常状態であったと考えられる．また，**図-7**より，計測された4回分の断面流量の平均値からの偏差は5%以内に収まっていることから，この時間帯の計測データはUSGSのガイドラインに基づいて考えれば十分な精度を有しているといえる．

以上のことから，本観測地点のように，橋脚後流の影響が大きく，表面流速が3m/s程度の順流断面と1.5m/s程度の逆流断面が混在する断面においても，日中で視界が良いこと，水面上のゴミが少ない等，作業条件が整えば，この橋上操作艇を用いることにより高精度の流況計測が可能であることが明らかとなった．ただし，操作性については，流速が3m/s程度の流れに対しても十分計

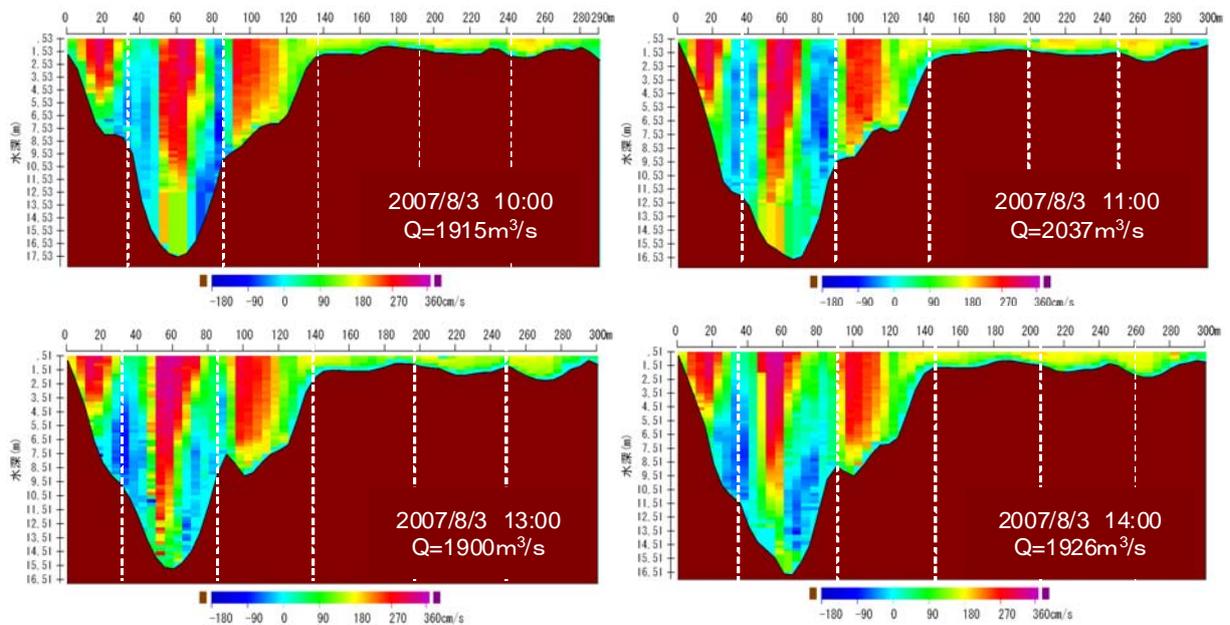



図-7　ADCPで観測した航跡補正後の横断河床形状と流速分布および流量

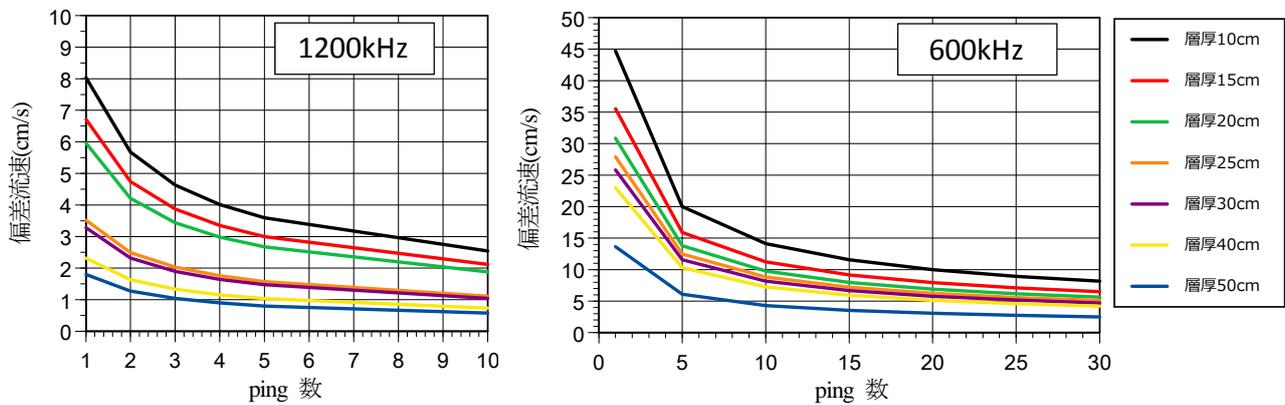



図-8　ADCPの観測層厚，ping数と流速精度(偏差流速)の関係

測可能であったが，順流から逆流へ(あるいは逆流から順流へ)変化する地点付近においてはボートの操作が難しく，転覆した場合が数回あった．その場合には横断面内の全流速分布が計測できず，流量値の算出ができないため，ボートの構造を転覆しにくくする等の工夫が今後必要である．

(4) ADCPで計測したデータの精度評価指標の提案

これまでADCPを用いた流況観測の計測精度評価に関する検証事例として，平水時におけるADCPの計測精度評価については，木下[3]によっていち早く実施され，土木研究所の長大検定水路においてADCPのウォーターピング(流速分布を計測するために発射する超音波)の検定，さらに新潟東港において，流出入量の全くない条件でウォーターピングと対地速度を計測するボトムピングから得られる計測値を比較し，4往復8回の計測において，ミリメートル単位の流速差であったことを示している．実河川の流水に対するADCPの精度検証事例としては，島田[4]らは石狩川の平水時において，ADCPを搭載したラジコンボートによる移動観測と設置型ADCPの比較を行って，ピング数(超音波の発射回数)とボートの走行速度の違いによる両者の相対誤差の関係を調べている．また，二瓶ら[5]は江戸川の小規模出水時(350～570m^3/s程度)において，ADCPの移動観測と定点固定観測で得られた流量を比較し，相対誤差が1.6～7.8%であったことから，ADCPの移動観測精度が高いことを示している．

図-8に固定観測における1200kHzタイプおよび600kHzタイプのADCPの設定層厚とピング数による流速計測精度の関係を示す．標準モード(WM1)では1ping当たりの流速計測値に含まれる誤差分の標準偏差(著者らは偏差流速と定義している)は，一般に用いられる1200kHzタイプの場合，層厚25cmで13.6cm/sで，600kHzタイプでは28cm/sとなる．また，ADCPの計測精度は，観測層厚にも大きく依存しており，層厚を小さくするほど，水深方向の解像度は増えるが，各グリッドの計測精度は小さくなることがわかる．600kHzタイプは，1200kHzタイプに比べて計測精度は劣るものの，濁度が大きい流れの計測や河床が移動する場合の計測に向いて

おり，対象とする流れ場に応じて対応する必要がある．本観測で用いたハイスピードサンプリングモード(Mode12)では1ピングの間に補助的なサブピングを高速連射することにより，同じ層厚，計測時間でも誤差流速は4.31cm/sまで向上される．逆にいえば，同じ計測精度を求めるのに，計測時間を短くすることができ，移動観測に向いているといえる．設定層厚の増加による計測精度の減少傾向をみると，層厚25cmより小さくする場合に，精度が大幅に減少する．また，ピング数は20発付近で収束し，それ以上の精度向上は小さいため，1200kHzタイプで移動観測を行う場合には観測層厚25cm，ピング数20程度が効果的に精度を確保できる設定といえる．**図-8**に示したADCPの計測設定条件と計測精度の関係については，一般に多く知られておらず，計測を専門にやっている技術者の経験的に理解されている程度であった．対象とする流れ場の水深，濁度，必要とする層厚数，計測精度，計測時間等，さまざまな流れの条件におけるこれらの関係性を理解したうえで，観測条件を決定することが計測精度を向上させるうえで重要である．

固定観測では，機器の計測設定条件が決まれば，同地点に発射する超音波の発射回数(ウォーターピング数)が多いほど得られたデータの計測精度は高くなる．したがって，移動観測の場合にも空間解像度を小さくするために可能な限り長い時間をかけて計測するのが望ましい．しかしながら，実際には各地点の流速によってボートが上下流方向に流される場合やボートの揺動(ローリングやピッチング)による誤差を小さくするために移動速度を調整することから，空間解像度は場所によって異なる．すなわち，移動観測の場合には**図-9**に示すように固定観測の精度の“線”的な考え方を“面”的に拡張し，単位移動距離あたりの計測精度と始点から終点までの計測断面全体の平均的な計測精度を算出することが重要となる．ここに，移動観測における計測精度を表す指標として，単位移動距離あたりの流速計測値が含む誤差流速の標準偏差を偏差流速(Deviation Velocity)，偏差流速を断面全体で積分したものを偏差流量と定義する．流れ場の精度評価には，各グリッドにおける偏差流速と流速計測値の比である偏差流速比を，断面流量の精度評価には，偏差流量と計測した断面流量値の比である偏差流量比を提案する．例えば，USGSの流量観測に係わるガイドラインのように，往復計測を行った際の横断面流量誤差が5%以内であっても，ADCPの計測設定条件および計測方法により，この指標が異なるため，計測したデータの精度評価が容易となる．**図-10**に**図-7**で示した洪水時(流量2000m^3/s程度)の計測時におけるボートの揺動，流速分布，偏差流速コンター，偏差流速比コンターを示す．偏差流量は約5m^3/sであった．順流域と逆流域が交互に生じている区間では，ボートをゆっくりと移動させながら計測でできかったため，偏差流速が大きくなり，それに伴い，逆流域における偏差流速比が6〜12%であった．

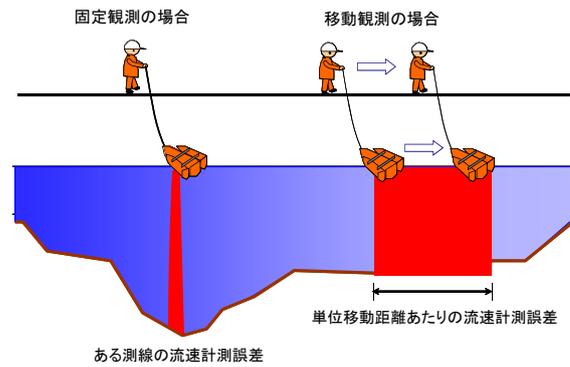



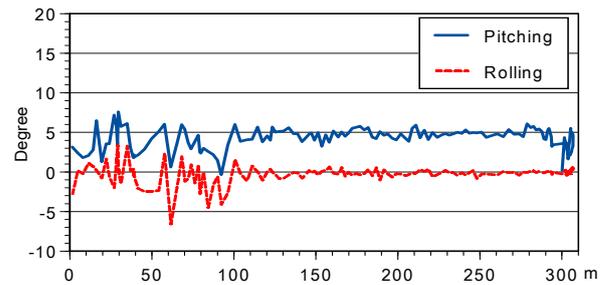
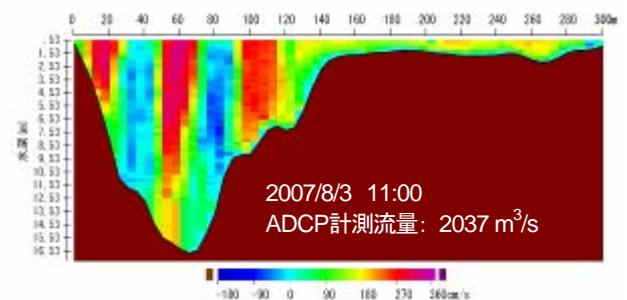
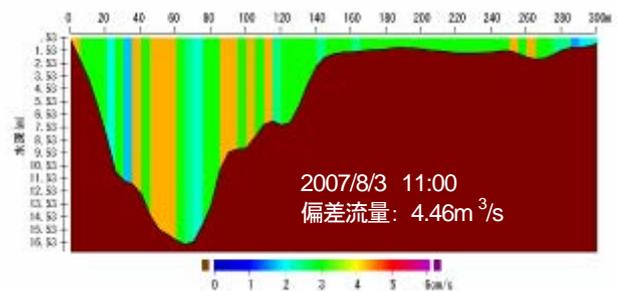
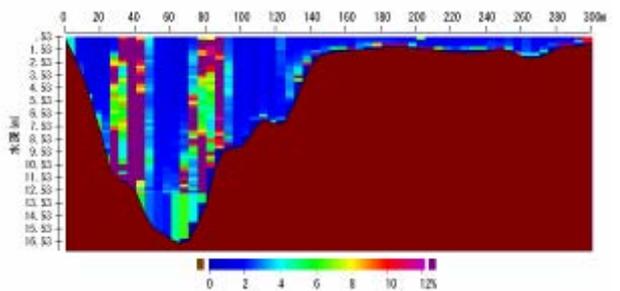
図-9　移動観測データの精度評価手法のイメージ

(a) River Boatの揺動 (2007/8/3 11:00)

(b) 流速コンター (2007/8/3 11:00)

(c) 偏差流速コンター (2007/8/3 11:00)

(d) 偏差流速比コンター (2007/8/3 11:00)

図-10　四万十川具同地点において洪水時に計測したボートの揺動，流速分布，偏差流速コンターおよび偏差流速比コンター

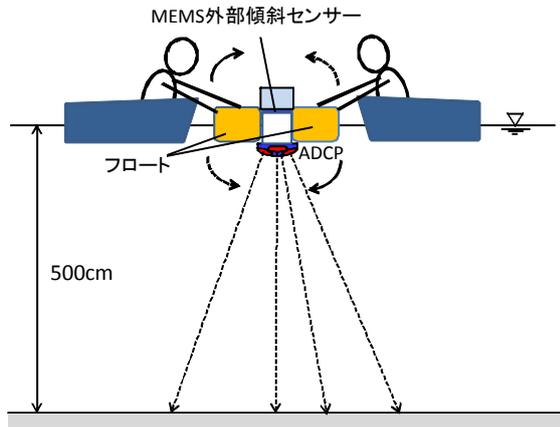



図-11 大型水槽におけるADCP搭載浮体の揺動実験

表-3 ADCPの計測設定と揺動実験条件

Workhorse ADCP 600kHz	
計測モード	WM1
計測層厚	0.50m
計測層数	30
アンサンブルタイム	0.28秒
ウォーターピング数	1
ボトムトラック機能	ON
固定観測における 流速誤差の標準偏差	13.62cm/s
揺動周期	1, 1.5, 2, 4 秒

また，出水時に橋上から曳航観測を行っているため，流速も大きくボートはほぼ上流向きであり，図-10(a)に示すボートの揺動をみると，ローリング(横揺れ)は高流速部で若干変動するものの，ほぼ0度に近い状態であった．一方，ピッチング(縦揺れ)はロープの引っ張り力により，常に約5度の角度で傾斜しており，高流速部では10度を超える場合もみられた．ボートの傾斜および揺動が計測値に及ぼす影響については次章で示す．

3. 橋上操作艇の計測時の揺動がADCP計測値に及ぼす影響

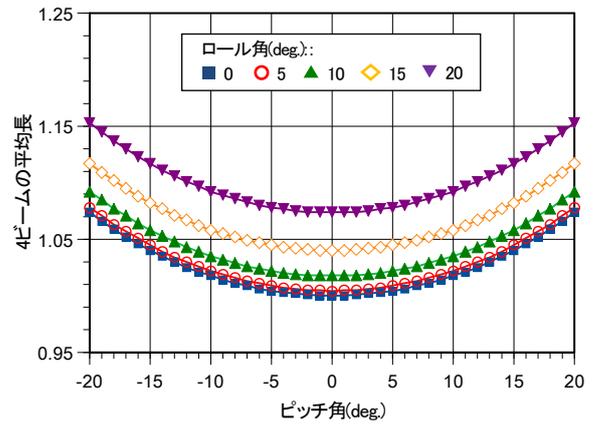
我が国において観測対象となる中規模出水以上の洪水流は，毎秒3mを超える高流速であるとともに，水面が大きく波立つような流況であり，既往の平水時や小規模出水時における精度検証結果をそのまま適用できるとは考え難い． 木下[3]は，静止水における精度検定の結果が洪水のように激しい流動水に適用して真値が得られているのかという他者からの批判に対して，検定は静止水，実際の使用は流動水であり，それを疑うことは当時のわが国の検定全てを疑うことになり，絶対流量値を正しく把握できるのは流量がゼロの場合のみであると考え，批判に顧慮せず現地観測を行ったとしている．しかしながら，図-10で示したように，洪水時には操作艇が揺動し，それによって水深や流速分布値に及ぼす影響を検証する必要がある．これは，ADCP観測では一般にボートの傾斜角補正を行っていないこと，ADCPに内蔵されている傾斜センサーが液面検知式であり，揺動周期が短く振幅が大きい場合に追従できていない可能性がためである．したがって，ADCPの揺動(傾斜角)の計測特性およびそれが流速分布および水深の出力値に及ぼす影響を定量的に評価でき，データ補正法が確立できれば，ADCPが洪水時においても十分な精度で計測可能であるという検証になり得る．このような背景から，はじめに大型水槽(25m× 25m×5m)において，ADCP搭載ボートに高精度のMEMS傾斜センサーを設置して種々の周期で揺動させる実験を行い，ADCPの傾斜角および水深に関する計測特性を調べる．つぎに，利根川平成大橋下流の高流速部において，ボートに水槽実験と同様な計測システムとRTK-GPSを搭載した流況計測を行い，ボートの揺動が流速計測値に及ぼす影響を明らかにする．

(1) 大型水槽を用いたADCPの傾斜角，水深計測特性に関する揺動実験

ADCPの傾斜角および水深の計測特性を明らかにするため，図-11に示すADCPを設置した浮体に高精度のMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)傾斜センサー(Xbow社製：NAV440)を搭載し，周期的な揺動を手動で与えて，2種類の傾斜センサーで傾斜角を連続的に計測し，ADCPでは水深計測も同時に行った．表-3に揺動実験で用いたADCPの計測設定と実験条件を示す．実験にはTeledyne RDI社製のADCP (Workhorse600kHz)を使用し，一般に用いられる計測モード(WM1)で層厚0.5m，層数30とした．(水槽の水深は5mであるため，データが得られる層数は10層である．) ウォーターピングは計測精度を高めるために，通常は複数回発射してデータをアンサンブル平均するが，ここではADCPの基本性能を明らかにすること，ADCPおよびMEMSで出力される傾斜角データを比較することを目的とするために1ピングとした．浮体に与える揺動周期は，図-10のボートの揺動周期の値(1~2秒程度)を参考に4秒，2秒，1.5秒，1秒の4ケースとし，メトロノームを使用して1軸(ピッチ：縦揺れ)方向に，ADCPの傾斜センサーの計測範囲(±20度)を考慮して傾斜角15～20度を目標に揺動を与えた．つまり，本実験で与える揺動周期および振幅の条件は，ADCPで洪水流計測を行う際の最も厳しい流況を想定していると考えてよい．なお，MEMSセンサーの計測範囲はロール±180度，ピッチ± 90度である．

図-12に各揺動周期におけるADCPの内部傾斜センサーとMEMS傾斜センサーで計測したピッチ角の時系列を示す．なお, 傾斜角データは, 機器の特性上, MEMS傾斜センサーは0.20秒, ADCP内部傾斜センサーは0.28秒ごとに出力されている. 2種類の傾斜センサーの計測値を比較すると，周期4秒では振幅のピーク付近でAD CPのセ

表−4　各揺動周期におけるADCPとMEMS傾斜センサーの振幅比

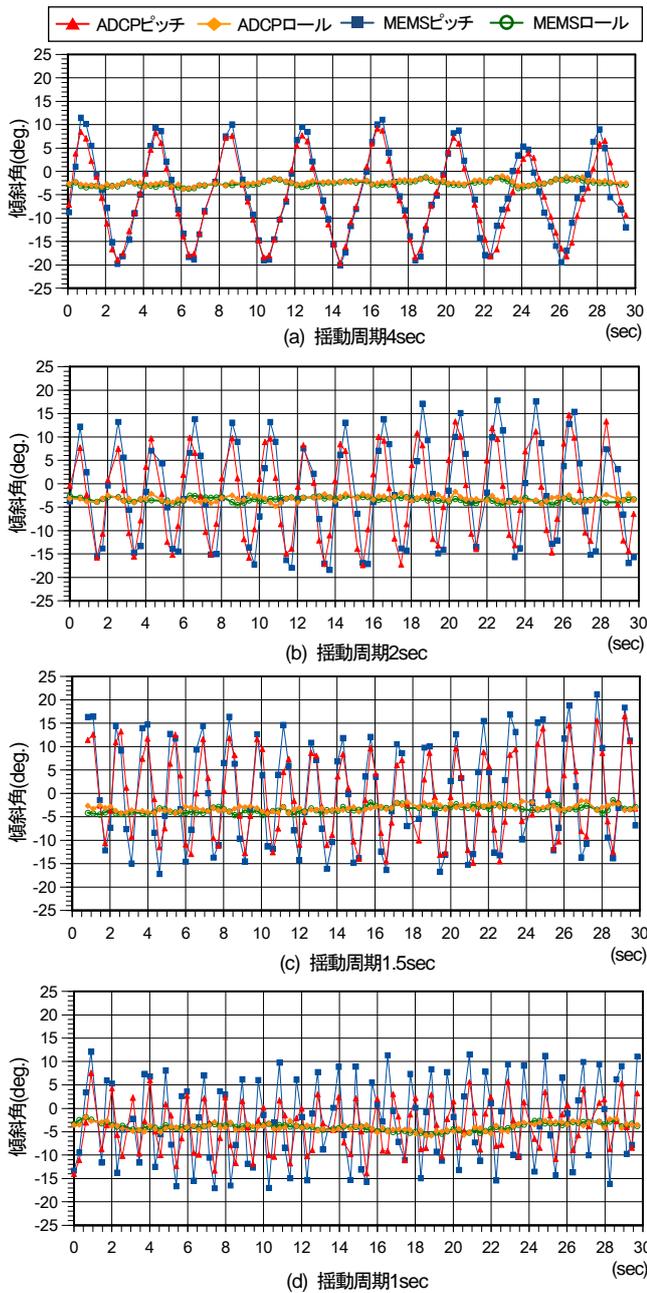
揺動周期	①ADCP振幅(deg.)	②MEMS振幅(deg.)	①／②
4sec	12.89	14.71	0.88
2sec	12.77	16.39	0.78
1.5sec	11.36	15.83	0.72
1sec	6.30	13.56	0.47

図−13　水深1の水槽における傾斜角(ピッチ・ロール)とADCPの4ビームの平均長の関係

ADCPピッチ　ADCPロール　MEMSピッチ　MEMSロール

(a) 揺動周期4sec

(b) 揺動周期2sec

(c) 揺動周期1.5sec

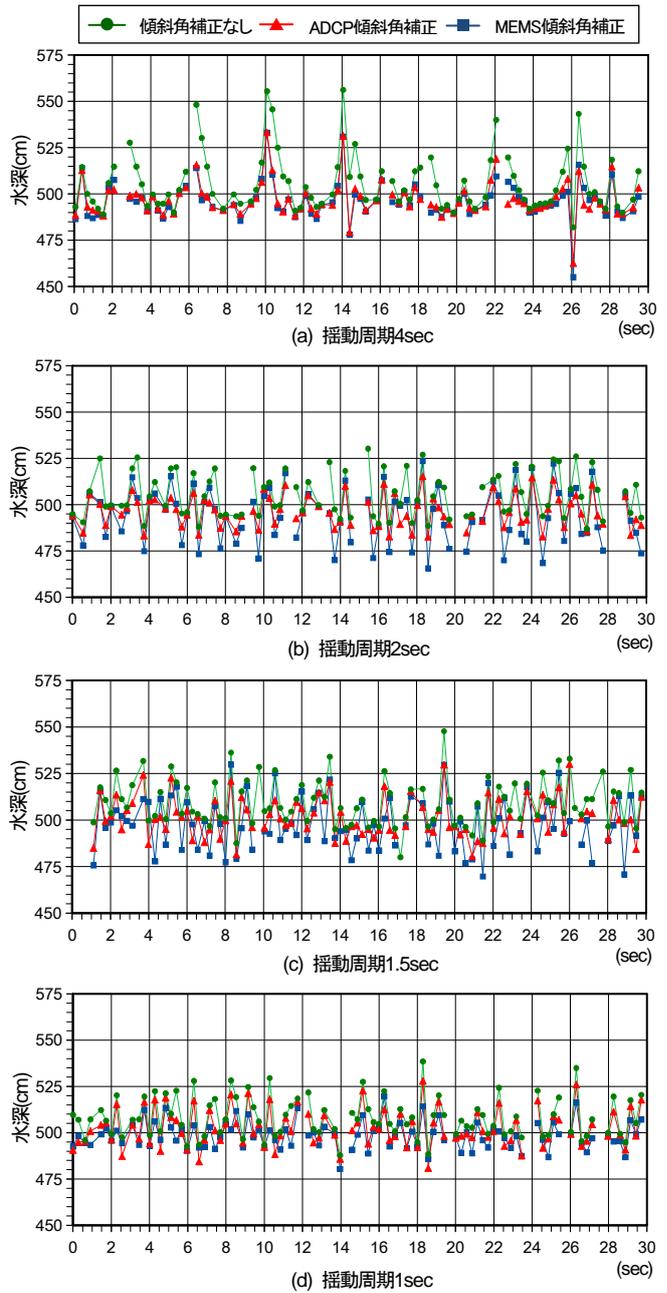
(d) 揺動周期1sec

図−12　ADCP内蔵傾斜センサーとMEMS傾斜センサーで計測された各揺動周期における傾斜角の時系列

傾斜角補正なし　ADCP傾斜角補正　MEMS傾斜角補正

(a) 揺動周期4sec

(b) 揺動周期2sec

(c) 揺動周期1.5sec

(d) 揺動周期1sec

図−14　ADCPの4ビームの平均長とADCPおよびMEMS傾斜センサーデータを用いた傾斜角補正による水深の比較

ンサーの値が若干小さくなっているものの，ほぼ同様な値を出力している．しかし，揺動周期が短くなるほど両センサーで計測された傾斜角のピーク値に差が生じ，ADCPに内蔵されている液面検知式の傾斜センサーでは追従できていないことが明らかとなった．実験から得られた各センサーの振幅の平均値と両者の比を**表-4**に示す．MEMS傾斜センサーがおよそ14度から16度の範囲の揺動振幅であるのに対して，ADCPの内部傾斜センサーの振幅の割合は，周期4秒で0.88，周期2秒で0.78，周期1.5秒で0.72，周期1秒では0.47となっている．すなわち，本実験条件では1秒の揺動周期に対してADCPで計測する振幅が約1/2になることがわかった．

つぎに，水深計測値に関する考察と傾斜角を用いた補正法の効果について検討する．本研究で使用するADCPでは，鉛直下向きに対して20度の傾きで4方向に超音波を発射し，各ビーム長さをそれぞれ20度の傾斜分を補正した後にそれらの平均値をその地点の水深として出力する．ADCPが傾斜する場合にはその影響は考慮されておらず，データ補正を行うには現時点では計測後に行う必要がある．ADCPの水深計測特性を考察するために，河床が平坦な基準化された水深1の水槽を想定して，ADCPを傾斜させた場合に4つのトランスデューサー(振動子)で計測されるビーム長の平均値を計算した．その結果，**図-13**に示すようにピッチ角およびロール角が0度のときには，水深は実際の値である1(最小値)となり，同様に5度のときに1.009，10度のときに1.035，15度で1.082，20度で1.153と傾斜角が大きくなるほどビーム長の平均値は実際の水深よりも大きくなる．特に傾斜角が10度から15度の差が大きく，本実験において設定した揺動の振幅(1軸方向のみに±15度)では，水深が最大で約4%大きく出力される．つぎに出力された水深をADCPおよびMEMSセンサーで計測した傾斜角を用いて補正を行う効果について考察した．**図-14**は水槽の水深500cmに対して，通常ADCPで水深として出力される4本のビーム長さの平均値(傾斜角補正なし)と**図-12**に示したADCPとMEMSセンサーで計測した傾斜角を用いて補正した場合を比較したものである．MEMSセンサーデータについては，出力タイミングがADCPと同じではないため，データ間を線形補完して同期させる形とした．4つのトランスデューサーのうち，ひとつでも欠測した水深データについては図から除いている．**図-2**と**図-4**の比較から，傾斜角が±20度程度になるときには，ビーム長(水深)の欠測が生じやすく，計測できた場合でも実際の水深よりも10%(50cm)程度大きい値を出力しているデータもみられる．また，揺動周期が4秒および2秒のケースでは，傾斜角が±15度以下であれば**図-3**で試算した通り，単純にADCPの4つのビーム長さを平均値して水深とする場合でもほとんどの値が5%(25cm)程度に収まっている．周期がそれよりも短くなると，ADCPとMEMSの計測値の差が大きくなるため，15度よりもさらに小さい値を閾値とする必要がある．いずれにしても，ADCPの傾斜センサーの計測範囲は20度であるが，実用上は傾斜角15度以下を閾値とすることが望ましいといえる．傾斜角が大きい地点の水深値についてはADCPで計測したデータを用いて，ポストプロセッシングの補正計算を行うことにより計測精度を向上させることができる．

図-14のMEMSセンサーデータを用いた傾斜角補正では，(b)周期2秒と(c)周期1.5秒において，補正した水深値が実際よりも過小に評価しているのは補完によるMEMSの傾斜角データとADCPのビーム長データの同期が不十分であるため生じたと考えられる．現地河川では本実験で用いた水槽のように河床が平坦ではないため，ADCPを曳航する断面において，河岸付近等の河床形状が場所的に大きく変化する場合には計測精度が低下する．例として，水深が5mの地点において，ADCPが4つのビームで水深を計測する河床の範囲は直径約3.6mとなる．このような断面での観測では，筆者らはボートに音響測深機を別途搭載して，鉛直下向きに計測することで精度低下を回避している．この場合，音響測深機とADCPのデータを同期させることにより，前述した水深の傾斜角補正も可能であり，水深データの取得率を向上も期待できる．

(2) 利根川における高速流の現地観測

大型水槽実験において，ボートが揺動する場合のADCPの水深計測値に対して，傾斜角が15度以下であれば補正を行わなくてもほぼ5%程度と十分な計測精度を有することが明らかとなった．この結果に基づいて，揺動が流速分布に及ぼす影響を検討するため，利根川平成大橋下流付近において高速流の現地観測を行った．揺動による計測精度への影響を検証するには，島田ら[4]や二瓶ら[5]のように，ほぼ同じ地点で固定観測と移動観測を同時に行って比較するのが合理的であるが，計測条件が厳しいことから，計測精度を低下させる要因をボートの傾斜角のみと仮定した上で，各地点における流速分布を傾斜角に応じて補正を行い，補正の有無の違いから考察することとした．**図-15**に観測地点付近の平面図を示す．この地点では，平水時においのても流速が最大4m/sを超え，水面が大きく変動する流況であるため，洪水流を想定した条件で常時計測が可能である．現地では河川を横断するようにワイヤーを張り，専用ボートには1200kHzタイプのADCP，MEMS傾斜センサー(シリコンセンシング社製)に加え，ボトムトラッキングが機能しない場合に正確な位置を計測するためのRTK-GPSも搭載して流況計測を行った．ボートに搭載したこれらの計測機器のデータは，Remo ADCP(ハイドロシステム開発社製)を用いて，出力間隔1秒に同期させて河岸に設置したノートPCにリアルタイムに送信させた．**図-16**に計測システムの概要を，**表-5**に観測に用いたADCPの設定条件を示す．

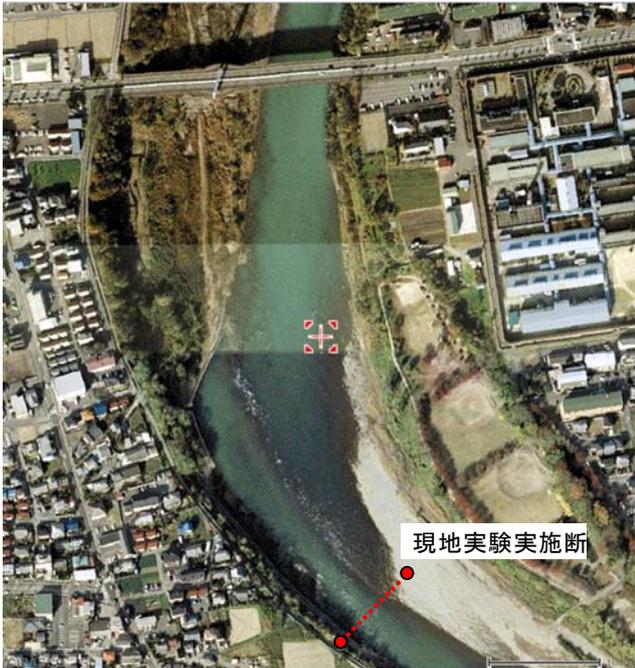



図-15　現地実験実施箇所(利根川大正橋付近)の平面図と平水時の流況

計測モード，層厚，層数等は一般的な設定であるが，揺動による流速値を補正するために，超音波のビーム方向成分を出力するビームコーディネーション(EX00000)を使用している．本観測においてもウォーターピング 1ピングあたりの計測特性値を検証するために，大型水槽実験と同様な設定条件とした．そのため，計測される流速値に含まれる流速誤差の標準偏差(偏差流速)は26.38cm/sと計測精度としては比較的大きい値となるが，川幅27mに対して，約3分間かけて計測(単位移動距離2mに対して10ピング超音波を発射)しており，各グリッドの平均的な偏差流速は7.34cm/sとなる．**図-17**に専用ボートにADCP，RTK-GPSおよびMEMS傾斜センサーを搭載し，高速流において実験を行っている状況を示す．河道中央部では毎秒4m程度の流速であった．

高速流計測に対してRTK-GPSを併用することの有効性を示す事例として，**図-18**にADCPのボトムトラックとRTK-GPSによる航跡の比較図を示す．ADCPのボトムトラック機能は，対地速度を計測することにより，ボートが移動する場合でも流水速度を算出できる機能であるが，本観測のように河床が移動する場合，あるいは水面が大きく揺動するには対地速度を計測するボトムピングが受信できずにデータ欠損を生じることがある．図にように同じ位置からスタートしても，その後青線のRTK－GPSの航跡は安定して位置を捉えている一方で，赤線のADCPのボトムトラックによる航跡は急に大きく位置が変化する状況がみられ，実際に計測している地点の座標を正しく出力できていない．ボートが揺動するほどの流況でなく，河床変動がほとんど生じていない場合には安価なD-GPSを使用して，大まかな位置座標を求めることも可能であるが，ADCPによる流況と河床変動の同時計

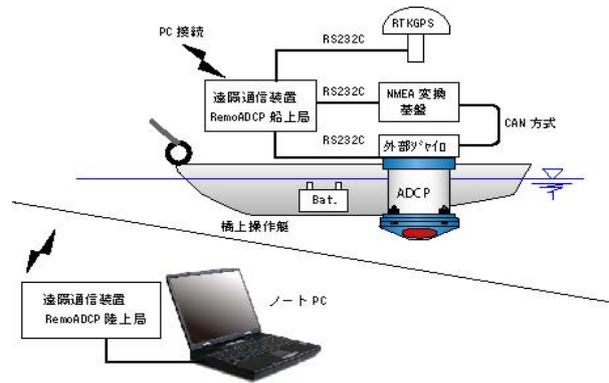



図-16 現地実験に用いた計測システムの概要

表-5 利根川観測におけるADCPの計測設定条件

Workhorse ADCP 1200kHz	
計測モード	WM1
計測層厚	0.20m
計測層数	15
アンサンブルタイム	0.25秒
ウォーターピング 数	1
ボトムトラック機能	ON
偏差流速※1	26.28cm/s
計測コーディネーション	ビームコーディネーション※2

※1 固定観測における流速誤差の標準偏差
※2 ビーム方向の流速成分を出力する

図-17 ボートにADCP，RTK-GPS，MEMS傾斜センサーを搭載して揺動実験を行っている状況

測技術への応用を考えると，高精度のRTK-GPSを併用することが望ましいといえる．

図-19にADCPの内部傾斜センサーとMEMSセンサーで得られた傾斜角から，流速値を補正する方法の概念図を示す．本研究では，Teledyne RDI社が公表している方法[6]を用いている．縦揺れ(ピッチ)方向のみの傾斜を考えると図中の方程式を解いて，流下軸方向および鉛直方向成分の流速を補正する．同様に，横揺れ(ロール)方向についても流下軸に対して直交方向と鉛直方向成分の流速を求める．**図-20**にADCPの内部傾斜センサーとMEMSセンサーで計測したピッチ角，ロール角の時系列と傾斜角補正を行った水面下50cmにおける流下軸方向

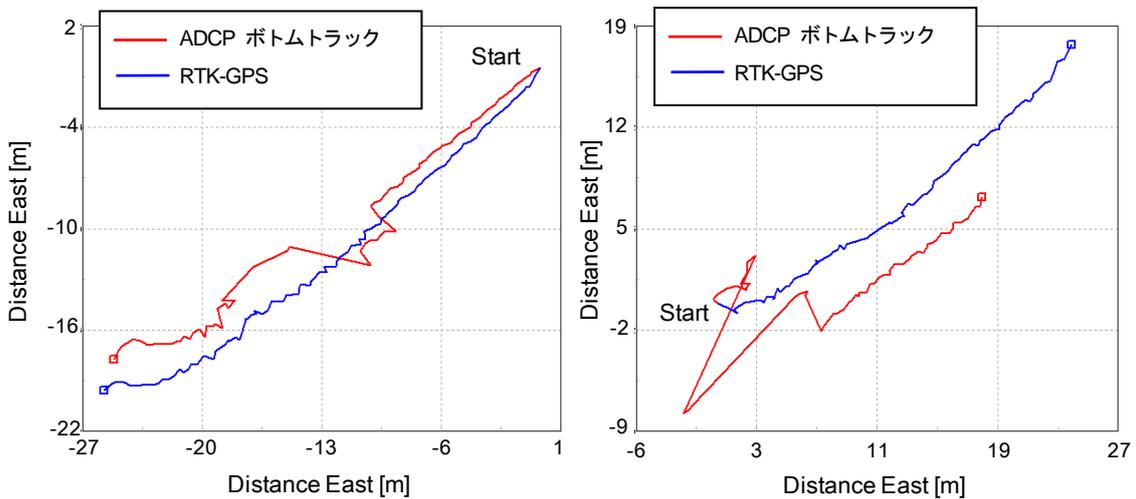



図-18　ADCPのボトムトラッキング機能とRTK-GPSによる航跡の比較

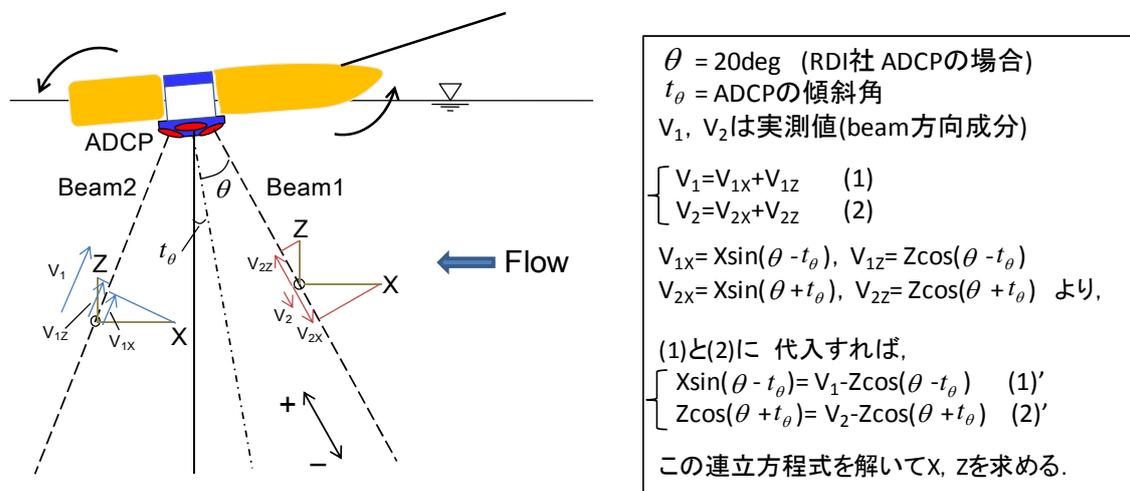



図-19　ADCPおよびMEMS傾斜センサーで得られた傾斜角を用いた流速補正方法
(ピッチ(流下方向に対して縦揺れ)方向にのみ傾斜する場合)

の流速分布を示す．両者の流速と傾斜角を比較すると，河岸近傍の流速が小さい区間では，各センサーが計測するピッチ角，ロール角とも傾斜角は小さく，両者の計測値もほぼ等しくなっている．しかし，主流部の流速が毎秒3mを超える高流速区間では，ボートの揺動により傾斜角が小刻みに変動し，ピッチ角の周期は2秒から3秒，ロール角の周期は1秒から2秒となっている．計測された揺動に位相差が生じる場合には，両者の計測された傾斜角の差が10度を超える場合もみられた．また，流速の計測値に欠損が見られるのは，ピッチおよびロール角が15度を超えるときであり，揺動の周期が短く，振幅が大きいとき生じていることがわかる．

つぎに，図-21にADCPおよびMEMS傾斜センサーの傾斜角補正の有無による流下軸方向の流速コンターおよび断面流量の比較を示す．横軸は左岸からの距離で図-20と異なるが，横断方向にほぼ等速度で計測を行っているため，同様に考えてよい．通常，データ欠測が生じた場合は内挿補完を行って断面内の流速分布図を作成する

表-6 ボートが流下軸に対面する場合の傾斜角補正[8]による流下軸方向流速値への影響(%)

		ロール角(deg)				
		0	5	10	15	20
ピッチ角(deg)	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.37	0.37	0.36	0.35	0.33
	10	1.52	1.50	1.47	1.41	1.34
	15	3.40	3.37	3.30	3.18	3.02
	20	6.03	5.98	5.86	5.65	5.37

※ あるグリッドの実際の流速を100とすると，ピッチ角およびロール角が15度傾斜していれば96.70となる．

が，ここでは各計測グリッドにおける傾斜補正の影響の検証を目的としているため，補完していない．断面流量を算出した結果，傾斜角補正を行わなかった場合に48.00m^3/s，ADCPの傾斜角で補正したものが49.85m^3/s，MEMSの傾斜角で補正したものが49.91m^3/sとなり，傾斜角補正の有無による差は約2%であり，ADCPとMEMSの傾斜角を用いた補正による流量差はほとんど無いという

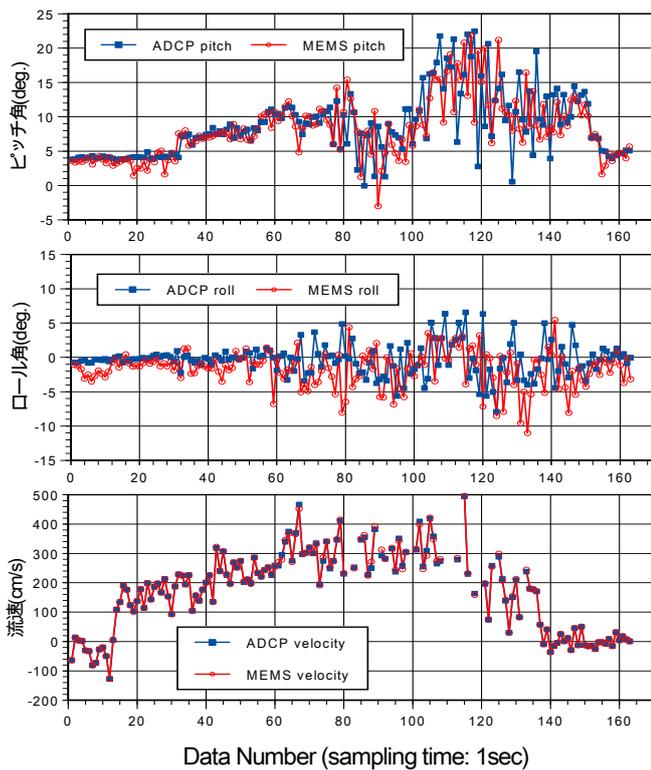



図-20　ADCPおよびMEMSセンサーで計測した傾斜角の時系列と水面下50cmにおける流下軸方向の横断流速分布

図-21　ADCPおよびMEMS傾斜センサーの傾斜角補正の有無による流下軸方向の流速コンターの比較

結果となった.

この理由について考察するために，表-6にこの傾斜角補正方法[6]を用いて，ボートが流下軸に対面する(船首が上流を向く)状況で，傾斜角(ピッチ角，ロール角)を種々変化させた場合の流速値の補正効果を示す．ピッチ角が0度の場合には，流下軸方向の流速値はロール角の影響を受けず，両者が5度傾斜する場合には0.37%，10度の場合は1.47%，15度の場合は3.18%小さく出力されることになる．したがって，図-21において，ADCPの傾斜角を用いて補正を行った後の流速値がMEMSより大きくなったのは，計測された傾斜角が小さかったため，流速の補正量が小さかったことが主な原因として考えられる．また，図-20においては傾斜角補正によって，補正していない流速値から小さくなるが，水深は傾斜によって大きく算出するため，断面積分して流量換算する際にキャンセルされることから有意な差が生じなくなるものと考えられる．なお，水槽実験で明らかとなった短い揺動周期時に生じる傾斜角の計測精度低下についても，水深に違いは見られなかった.

以上のことから，ADCP搭載ボートが揺動する場合の計測精度低下の要因を傾斜角のみと仮定すれば，ボートが傾斜することによる流速値への影響は，傾斜角15度でも3%程度であり，流量換算を行っても最大で同程度の差が生じる程度であることが明らかとなった.

4. おわりに

本稿では，まずADCPを用いた洪水流量観測精度の向上を目的として，四万十川具同地点において行った洪水時の橋上操作艇による流況観測結果から，航跡補正による流速補完法および移動観測における計測精度評価法を検討した．ADCP搭載ボートの航跡が蛇行する場合の航跡補正方法として，航跡を直線化して流量を算出する手法を提案し，一般に用いられる航跡直交成分を用いて算出した流量と同程度となることを示した．その結果，浮子観測やH-ADCPで計測したデータとの比較が容易になった．さらに，ADCPの計測設定条件から得られる固定観測の計測精度の考え方に基づいて，移動観測データの計測精度を評価する新しい指標として偏差流速を提案し，偏差流量，偏差流速比は，ボートの揺動が小さい平水時においては，流量および流速分布の計測精度を示す有用な指標となり得ることがわかった．洪水時にボートが傾斜および揺動する場合には，水深・流速計測値に影響を及ぼし，計測精度が低下する可能性があり，定量的な評価と検証が必要と結論付けた.

これらの結果に基づいて，洪水観測時のADCPを搭載したボートの揺動が水深および流速計測値に及ぼす影響を明らかにするために，大型水槽および現地河川において，ADCP搭載ボートに高精度MEMS傾斜センサーを設置して揺動実験および現地観測を行った．大型水槽を

用いた揺動実験において，本実験で設定した厳しい洪水流観測を想定した条件(揺動振幅±15度程度)では，ボートの揺動周期が1～2秒程度まで短くなると，ADCPの内部傾斜センサーが追従できず，傾斜角を過小評価(周期1秒では約1/2)すること，ボートの傾斜角(ADCPの計測値)15度を閾値とすれば，傾斜による補正を行わずに単純にADCPの4つのビーム長さを平均値して水深とする場合でも，揺動周期が2秒以上であれば計測精度としては5%を十分確保できることを明らかにした.

現地河川において高速流の流量観測を行った結果，高精度のMEMS傾斜センサーを用いて揺動による流速計測値の補正を行っても，断面積分した流量値に補正前との有意な差が見られなかった．これは，ADCPの計測特性として，搭載したボートが傾斜する場合に15度を閾値とすれば，流速は実際の値よりも最大5％程度小さく出力されるのに対して，水深は実際の値よりも最大5％程度大きく出力されることが要因である．傾斜角が15度以下を抑えることができれば計測精度は最大でも5%程度と考えればよいことがわかった．これらの結果は，厳しい条件の洪水流計測においても，ボートの揺動自体が水深および流速値に及ぼす影響は小さいという著者らが当初想定していたものと異なるものである．しかし，木下が行った静水中におけるADCPの計測精度検証結果に基づいて，流水中における精度検証を行った点は今後の洪水観測において極めて重要な知見となった.

ただし，洪水流況と河床変動の同時計測技術の構築に向けては，現地観測においてボートの傾斜角が15度を超える場合に流速欠損が多く生じたことから，揺動の小さい船艇設計および洪水計測手法の工夫はデータの取得率を向上させるとともに，計測精度の確保のために重要な課題といえる．この点についても，著者らが既に検討している[7]が，誌面の関係上，割愛させていただく.

ADCPを用いた計測技術は，超音波の散乱強度を用いた浮遊砂量の推定技術[8]もほぼ実用化段階に入っており，さらに，Rennieら[9]，萬矢ら[10]はADCPで対地速度が計測できることを利用して，RTK-GPSを併用した河床移動速度および掃流砂計測技術の開発を試みている．これらの計測技術が確立できれば，ADCPのみで洪水流量，掃流砂および浮遊砂量の同時計測が可能となり，実河川における洪水時の流れと流砂現象の解明に大きく寄与するものと考えられる.

参考文献

1) Kevin A. Oberg, Scott E. Morlock and William S. Caldwell: Quality-Assurance Plan for Discharge Measurements Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers,U.S.G.S. Scientific Investigation Report 2005-5183
2) David Mueller: Techniques for Measuring Stream flow with an ADCP in Moving-Bed Conditions, ADCPs in Action 2005.
3) 木下良作：ADCP(超音波流速計)による流量と流れの構造について，第4回河川環境管理財団研究発表会講演録，2006.
4) 島田友典，渡邊康玄：ADCPを搭載したラジコンボートによる流水中の流速測定精度，土木学会第62回年次学術講演概要集，II-106，2007.
5) 色川有，二瓶泰雄，北山秀飛：ADCPによる流量計測精度の基礎的検証，土木学会第61回年次学術講演概要集，II-219, 2006.
6) TELEDYNE RD INSTRUMENTS: ADCP Coodinate Transformation, Formulas and Calculations, P/N 951-6079-00, 2008
7) 萬矢敦啓，岡田将治，橘田隆史，菅野裕也，深見和彦：高速流のおけるADCP観測のための橋上操作艇に関する提案，土木学会 河川技術論文集第16巻，2010.
8) Rennie and et al.: Measurement of bed load velocity using an Acoustic Doppler Current Profiler, J. Hyd. Eng., Vol. 128, No.5, 2002.
9) 橘田隆史，岡田将治，新井励，下田力，出口恭：ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察，土木学会 河川技術論文集第14巻，2008.
10) 萬矢敦啓，岡田将治，江島敬三，菅野裕也，深見和彦：ADCPを用いた摩擦速度と掃流砂量の算定方法，土木学会水工学論文集，第54巻，2010.

（2010. 7. 20受付）

河川実務者の観点から見た ADCPによる流量観測技術開発の論点

Key points for developing water discharge measurement techniques using ADCP from field engineers' perspective

萬矢敦啓[1]・菅野裕也[2]・深見和彦[3]
Atsuhiro YOROZUYA, Yuya KANNO and Kazuhiko FUKAMI

[1]正会員　Ph.D.　土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター（〒305-8516 つくば市南原1-6）
[2]正会員　土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター（〒305-8516 つくば市南原1-6）
[3]正会員 修士(工学) 土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター（〒305-8516 つくば市南原1-6）

Acoustic Current Profilers (ADCP) are the only device that can measure three dimensional velocity profiles and river bed conditions even during flooding. To fully exert ADCP, it is extremely important to understand their limitations and employ peripheral devices (PDs) effectively. The limitations of ADCP originate from an assumption commonly seen in similar devices. This paper presents flow types which can be measured by ADCP with the limitations, the appropriate usage of PDs combined with ADCP, as well as few technical aspects related to obtaining water discharge values.

Key Words : *Acoustic Doppler Current Profiler, water discharge measurement, limitation , peripheral devices*

1. はじめに

自然河川で流況を把握することはそれほど簡単ではない．特に洪水中の河道内には，流木やゴミなどの流下物が存在すること，また場合によっては河川表面が大きく振動することで，計測を行うという行為そのものに対して恐怖を感じることがある．著者らが経験した必ずしも流量は大きくないが，流況として厳しかったときの表面流速は，最も早いところで6m/s，水面の振動は1m程度あった．そのような状況において，河床がどのように変化しているのか，掃流砂はどの程度あるかなどは，現象的にも非常に興味深く，かつ工学的にも重要であり，このような現象を把握することができる唯一の計測機器がADCPである．しかしながらADCPがどれほど優秀であったとしても，ADCP単体だけでは河川の流況計測は成り立たず，それを完成させるためには，ADCPを河川表面に接触させるための船体[1)2)3)]，ADCP自体の移動速度を計測するためのGPS，また計測の効率をよくするためのデータ転送システム等が必要である．これらの機器を組み合わせることで，ADCPは河川のモニタリング機器としては無限の可能性を持つが，一方で，計測原理故の注意点なども考慮する必要がある．ここでは安全・確実で信頼性の高い計測を実行するために著者らが議論してきた事を，最も基本的なことから最新の内容にわたり報告したい．なおADCPを用いた計測に関しては，ラジコンボートを使用する方法[1)]，ADCPを川底に沈めて計測する方法[4)]等，複数の手法があるが，ここでは橋上操作艇を用いた手法を基本として議論を進める．

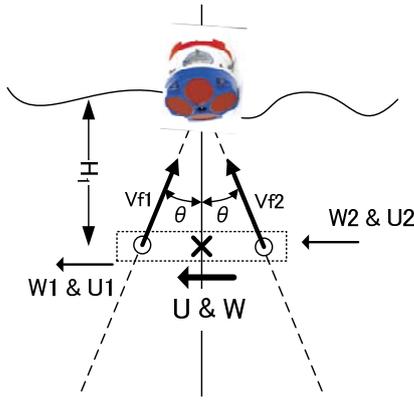
2．ADCPの計測原理と使用限界

(1) ADCPの計測原理

ADCPの計測原理に関して説明する論文は複数あるため，詳細については参考文献[5)6)]を参照されたい．ここでは著者らの議論が明確になるよう，必要な部分だけ掻い摘み説明を行う．

図-1はADCPの計測原理の概要を示す．図が示すように，多くのprofiler型の流速計は複数の音波をトランスデューサ（図中のADCPの写真の部分）から角度θで照射する．ここで実際に計測しているのは，ドップラー効果による音波の周波数の変化であり，これをビーム方向の流速に変換している．この図では二つのトランスデュー

図-1 ADCPの計測原理

図-2 電磁流速計とADCPによる比較観測

サを用いた概念を示しているが，実際には三次元の流速計のため，4つのビームを使用する場合が多い．ここではビーム１により計測されたビーム方向の流速がV_{f1}，ビーム２により計測されたビーム方向の流速がV_{f2}となるが，これらの流速は，計測地点(ここではトランスデューサからH_i離れた場所)の局所的な流速（ここではU_i, W_i, i=1,2）の合成値に他ならない．それらを式(1)，(2)とする．

$$V_{f1} = W_1 \cos\theta + U_1 \sin\theta \qquad (1)$$

$$V_{f2} = W_2 \cos\theta + (-U_2) \sin\theta \qquad (2)$$

厳密には$U_1 \neq U_2$, $W_1 \neq W_2$であるが，それを$U_1 = U_2$, $W_1 = W_2$とするところにこのような流速計測機器の特徴がある．このような手法を用いた計測はADCPだけではなく，気象庁が風の風向風速の計測に実運用しているドップラーソーダも同じような仮定を用いている．このような仮定をすることで，H_iにおける流速値(U, W)を以下のように得る．

$$U = \frac{V_{f1} - V_{f2}}{2\sin\theta} \qquad (3)$$

$$W = \frac{V_{f1} - V_{f2}}{2\cos\theta} \qquad (4)$$

ここではH_iにおける計測値だけを考えているが，あらゆるHにおける計測を瞬間的（通常の観測では1～2秒に一回程度の出力）に行うことができる．ただしトランスデューサ付近の上層不感帯（音波を安定させせるのに必要な助走区間），サイドローブが影響することによる下層不感帯が存在する．また流速値を算出するための計測間隔（Control Section: CS）は

$$CS = 2H_1 \tan\theta \qquad (5)$$

となり，H_iが大きくなればなるほど，CSも大きくなることから計測条件が一定でないことも，特徴の一つである．

上記の議論は，二つのトランスデューサを用いた結果であるが，同様にして他の二つを用いて，式(6)及び(7)が示すようにV, Wを出力する．

$$V = \frac{V_{f3} - V_{f4}}{2\sin\theta} \qquad (6)$$

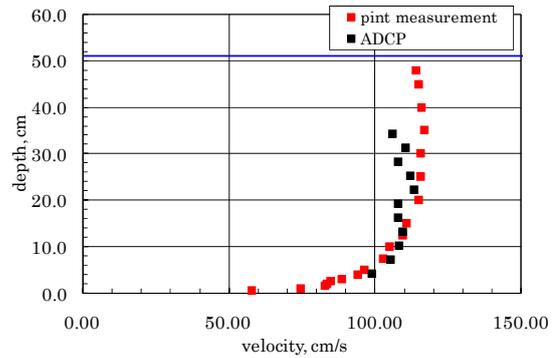
$$W = \frac{V_{f3} - V_{f4}}{2\cos\theta} \qquad (7)$$

式(4)，(7)が示すように異なるビーム方向流速から二つの異なる流速値Wが出力されることがわかる．このとき両者が完全に等しければ上記の仮定が100%成立していることになるが，実際の流況では一般的にこの値がゼロになることは稀である．ADCPはこの両者の差を⊿Wとして式(8)のように計算して，出力している．

$$\Delta W = \frac{V_{f1} - V_{f2} - V_{f3} + V_{f4}}{2\cos\theta} \qquad (8)$$

(2) 実験水路における比較観測

図-2は実験水路におけるADCPと電磁流速計の流速比較結果である．用いた水路の全長；35m，幅；1m，流量；500L/s，河床勾配；1/1200，河床粗度を加えるためにピラミットマット(高さ2.0mm,幅5.0mm)を敷き詰めている．ここで用いたADCPは，StreamProADCP及び，point measurement として電磁流速計を用いている．電磁流速計は点計測であり，計測位置の違いによる計測条件は一定である．他方，ADCPは式(5)が示すように計測位置によって計測条件が若干異なる．

図-2が示すように，ADCPの結果と電磁流速計の結果は全体的にほぼ等しく，全体的な流速差は5%程度である．電磁流速計による結果は，下層から中層にかけて対数則に近い分布を示している．また上層の水面付近では流速が遅くなっているが，これは本実験の水路幅・水深比が2程度であることが原因と考えられる[7]．一方，ADCPの結果は下層付近では電磁流速計の結果と良く合うが，上層付近では若干流速が遅くなる傾向にある．David et al[8]が示しているように，上層付近ではADCP本体が水中に没していることから，それ自体が抵抗となり，流速が遅くなっていると推定される．ここで特筆すべき点は，式(5)から計測間隔(CS)は水路底面付近で最も大きくなること，下層付近は河床の影響で流速の乱れが大きいこと

から，ADCP観測では下層付近の流速計測が最も苦手であることが想定される．しかしながら計測結果は電磁流速計に比較するとほぼ等しいことがわかった．

(3) 鉛直方向流速分布の算定方法

乱流の教科書に示されているように鉛直方向の流速分布は複数の異なるサイズの渦によって決まる[9]．その中で最も大きなサイズの渦は，水深規模のものである．その渦を含めてそれより小さいあらゆる大きさの渦により流速が分布することになる．著者らは，ADCPにより得られた流速分布をフーリエ級数展開することで最もらしい分布を得る手法を提案している[10)11)]．ここではその概要に触れることにする．式(9)は一般的なフーリエ級数の展開式である．

$$u(z)=\sum_{k=1}^{k_{mode}}u_{kc}\cos\left(\frac{\pi(k-1)z}{h}\right)+\sum_{k=1}^{k_{mode}}u_{ks}\sin\left(\frac{\pi(k-1)z}{h}\right) \quad (9)$$

ここで$u(z)$はある高さzでの算定された流速値，u_{kc}，u_{ks}はフーリエ係数，hは水深，k_{mode}はフーリエ級数の項数である．ここでは解析に用いた実験結果（図-2と同じ水路を用いた移動床実験の結果）から得られた流速分布を用いて解析の一例を説明する．この図-3は計測された主流方向の流速分布，誤差流速，式(9)を用いて算定した流速分布を示す．このとき式(9)のk_{mode}は∞である．この条件で算定した流速分布は観測結果を忠実に再現してしまうため，$u(z)$は観測結果同様に凸凹になる．ここで問題になるのは，k_{mode}をどの程度にすべきかという議論である．ここで議論を少し戻す．図-3に示されているΔWは式(8)のように示されるが，ここには計測手法の限界ばかりでなく，音響計測機器としてのバラつきなども含まれていることが想定される．すなわちADCPが計測する最も詳細な流速分布とは計測結果からΔW程度の流速差を持つものということになる．逆に言えばこれ以上細かい流速分布はADCPでは議論することができない．この考え方をもとに，著者らは式(10)を用いて算定手法を考案した[10)11)]．

$$\frac{1}{n}\sum\left[u(z)-u_{ob}(z)\right]^2\cong\frac{1}{n}\sum\Delta W^2 \quad (10)$$

ここで$u(z)$は式(9)，$u_{ob}(z)$はADCPによる計測結果，ΔWは式(8)によるADCPの計測結果である．この式を用いた著者らの算定手法とは，k_{mode}を徐々に増やしていき，式(10)を満たしたときのk_{mode}を採用するというものである．すなわちここで決定したk_{mode}以上∞までを構成する小さな渦は，計測誤差として判断し採用しない．ここで特徴的なのは，k_{mode}はある一定の値ではなく，その場で計測された流況に応じて変化することになる．またさらに特徴的なことは，k_{mode}以上の小さな渦が構成する流速分は，ADCPでは実質議論することが不可能であるが，それ以上の大きな渦が構成する流速分布は，かなり正しく計測する事を示唆するものである．図-4は上記のアルゴリズムにより算定した流速分布を示すが，eq(10)；▲は計測結果のばらつきの間を，dW程度の流速差を持ちながら分布していることがわかる．またlog；○は，対数則を計測範囲に適用して最小二乗法により求めた曲線であるが，これもまた同様にdW程度の流速差を持ちながら分布している．

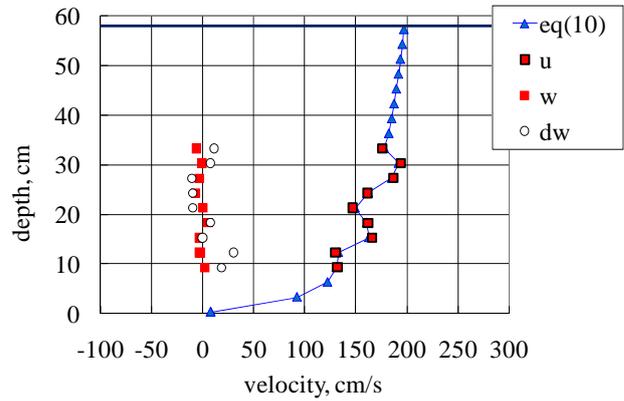
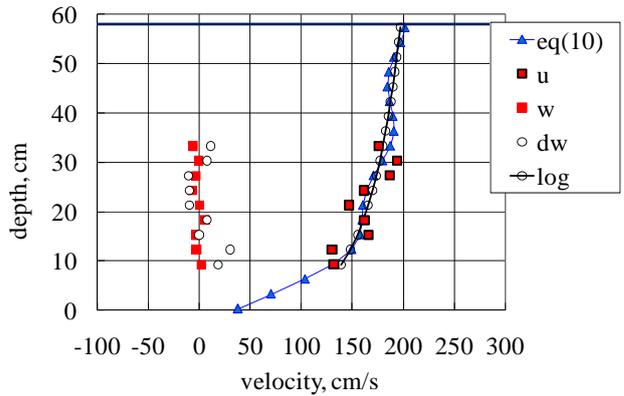



図-3 解析に用いた流速分布：主流方向流速，誤差流速の鉛直分布，式(10)(kmode=∞の時)を用いた分布

図-4 解析に用いた流速分布：主流方向流速，誤差流速の鉛直分布，式(10)(kmode≠∞の時)を用いた分布

(4) 実河川での鉛直方向流速分布

前節の議論は実験水路内で計測された結果をもとに議論を進めているが，実河川での計測に関しても議論を進めなくてはならない．すなわちここでの水深は50cm程度であるが，水深が5～10mのように大きくなった場合，どのような議論が必要かということである．洪水時の実河川において他の計測機器とADCPの比較観測を行うことは極めて難しいことから，図-2で示したような計測結果は稀であるが，上記の式(9)(10)を用いた議論は実河川においても同様の議論となる．すなわち式(10)で決定され，式(9)で採用されるk_{mode}以下の渦が構成する流速が計測の対象なのであれば実河川での流況もADCPは十分計測をすることができることが理解できる．別の言い方をすると渦の議論に関して相似関係が成り立つという意味である．ここでいう計測が可能な流速分布とは流量計測に最も重要な主流方向の鉛直流速分布を想定している．観測の対

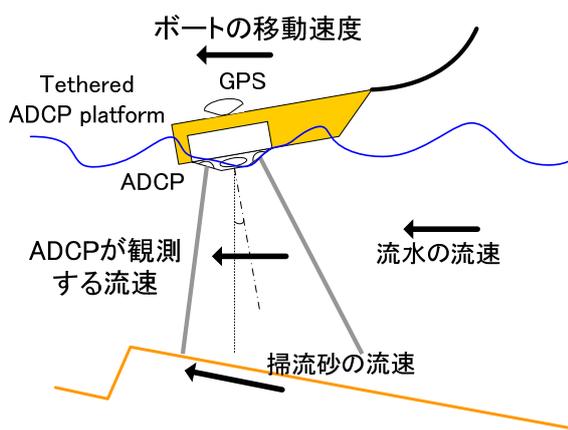



図-7 移動計測の概念図

象が河道湾曲部の二次流の場合，数値計算などを用いて詳細に検討する必要がある．また並列螺旋流のような水深と同規模の渦が逆向きに存在するような現象を考える必要がある場合，少し問題が生じる．これに関しては萬矢らの検討[12]を参照されたい．

(5) コマンドの設定方法

WH-ADCPを使用するにあたり，コマンドの設定が必須となる．またこれらのコマンドにより計測条件を決定することなる．多くのコマンドは観測対象の水深等の条件に合わせる必要があるためPlan ADCP等を用いて決定することになるが，その他のコマンドとして最も重要なことは観測の精度を保つことにある．詳細は岡田らに詳しい[13]．

(6) ADCPの計測に関する若干の注意点

Work Horse(WH)-ADCPを含めた船体に搭載する種類のADCPは傾斜センサーが内蔵されていて，流れによる船体の揺動でADCPが傾斜したとき，ADCPが出す音波が傾くことによる流速値を補正している．岡田らはWH-ADCPに搭載されている傾斜センサーが液面検知式であることに着目し，そこから派生する傾斜センサーの揺動追従性などの問題点を示唆し，大型水槽での実験及び実河川での観測を実施した[14)15]．結果WH-ADCPは，たとえ水面が激しく振動するような観測条件であっても，流量を正しく計測していることを示した．

一方，WH-ADCPは流向を求めるため磁気コンパスを採用している．しかしながら磁気コンパスは，搭載する船艇や計測環境によって影響を受ける．例えば搭載する船艇に強い磁場を作るようなエンジンや，ネジなどどのような小さなパーツにさえも金属が使用されている場合，ADCP周辺の磁場を狂わせ，結果流況計測に誤差が生じる原因となる．これらの影響を排除するため，RD社が発行しているWinRiver User GuideはCompass Correction のやり方を説明している[165]．また磁気コンパスが示す方角と実際の方角には偏角の影響で若干のずれがある．また偏角の程度は計測する地域によってもことなるため，適切な値を用いてWinRiver内で調整する必要がる．

３．ADCP観測に必要な周辺機器

ADCPを用いた流況及び流量観測を行うにあたり，安全であること，安定した計測であること，計測値の信頼性が高いことが求められるが，そのためには複数の周辺機器が必要となる．具体的には，(1)GPS，(2)データ転送装置，(3)橋上操作艇である．この章ではそれらの必要性を説明する．

(1) GPS

図-7はADCPによる移動計測に関する概念図である．ADCPに限らず，観測船（ここでは橋上操作艇）に搭載した計測機を移動させて計測する場合，一般的に次の式のようになる．

$$\vec{V}_{abs} = \vec{V}_{non-reference} + \vec{V}_{boat} \qquad (11)$$

式(11)の左辺が計測結果として必要な流速（図-7の流水の流速），右辺第一項がADCPの出力結果（図-7のADCPが観測する流速），右辺第二項が観測船の移動速度（図-7のボートの移動速度，すなわちADCP本体の移動速度）となる．式(11)が示すように，流水の流速の計測精度を向上させるには，ADCPの計測精度もさることながら観測船の移動速度に対する精度を上げる必要がある．観測船の移動速度を計測するために，WH-ADCPはボトムトラック機能を内蔵している．それが出力する速度は対地速度と呼ばれており，河床が移動しないという条件において，これを観測船の移動速度と考えることができ，またこの計測精度も高い．しかしながら，河床が移動する場合はその限りではない．そのような条件では高い精度を持つRTK-GPSを併用することが必須となる．この高い精度の位置情報の時間差分から観測船の移動速度を算出することになる．RTK-GPSを使用するには，GPS端末が二台，その両者でデータの交換をするための無線機が必要で，全体のシステムを構成するためには，ADCP本体以上の価格が必要であった．近年はVRS-RTK-GPSが日本国内で使用可能となり，RTK-GPSの半分以下の価格で高精度の観測が可能になった．これらを用いることで観測船の移動速度を正しく計測することができる．RTK-GPSの位置情報の精度は数cmでありその差分から移動速度を求めると，オーダーで数cm/s程度となる．

また最近では，VTG(Vector track an Speed over the Ground)を取得できるGPSが比較的安価に購入できるようになってきた．この情報は衛星とGPS本体のデータ通信に使用している電波のドップラー効果による周波数変化を活用し，GPS本体の移動速度を算出するものである．ここでは，位置情報とは独立した手法で移動速度を算出

している.

一方Navcom社SF-2110M/RはStarFireシステムを利用しているが，VRS-RTK-GPS単体の金額以下で50cm以内の測位精度と，VTGは3cm/s速度精度を持つ．またその上位機種であるNavcom社SF-3050は10cm以内の測位精度と，VTGは1cm/s速度精度を持つ．このGPSの最大の特徴は,世界中どこで計測しても同じ精度が得られることである．例えばSF-2110Mを用いてメコン川で流量観測を行う場合,相対位置情報は50cm程度の精度で,速度情報は3cm/s程度の精度で流速値を得ることが可能となる．ここで重要なのは川幅が1kmになるような大河川では,計測位置の相対誤差が50cm程度であることはほとんど問題にならず,それよりも流速値が3cm/s程度の精度で計測されることが重要である．このことから日本においてVRS-RTK-GPSで計測するのと同じような精度で,同様にメコン川でも流量観測が可能となる．詳細は販売メーカのHP等を参照されたい[17].

(b) 絶対流速分布と河床形状

(c) ボートの移動速度

図-8 WinRiver を用いた計測結果の一例

(a) RTK-GPSの位置情報に異常値が発生したときの例

RTK-GPSを用いて計測するときの注意点は，RTKモードで計測するということである．たとえ高精度・高価格の観測機器を準備したとしても，計測条件が悪くなり観測がRTKモードでなければ，観測船の移動速度の算出に大きな誤差をもたらす事になり，結果正しい流速値が算出されない．これを調べるためには，例えばNMEAフォーマットであれば，GPS quality indicatorが「4」である必要がある．以下に,GPSのクオリティが確保されなかったときの計測例を示す.

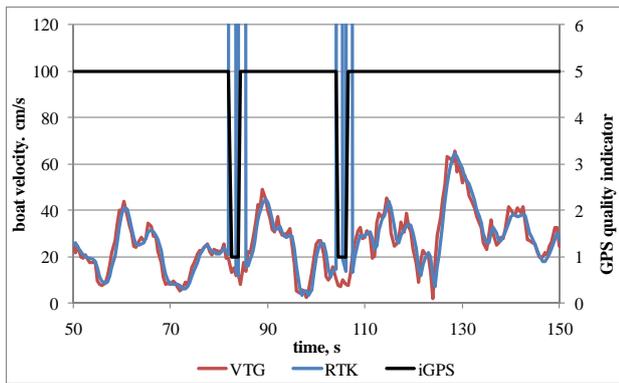
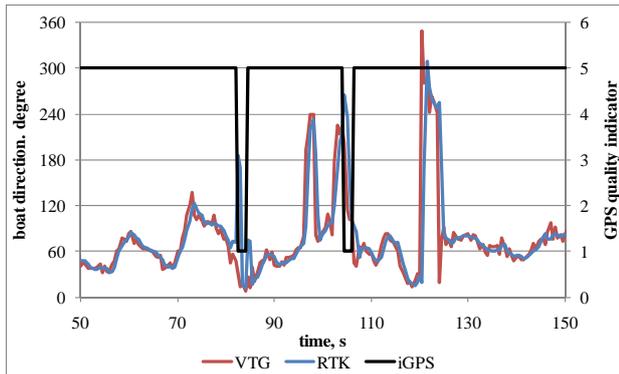
図-8a)b)c)は橋上操作艇を用いたADCPとVRS-RTK-GPSの同期観測結果の一例である．これらの図はTeledyne RD Instruments社のWinRiverを用いて描画した．図-8a)はADCP観測時の航跡及び平均流速を示す．このときの橋上操作艇の移動は右岸から左岸へ向かって行われ，流向は北西から南東となっている．図中の領域Aが示す付近で航跡に４カ所程度の不連続な点が生じている．そのときの河床高，絶対流速分布を図-8b)に示す．流速は0～1.5m/s程度の値を持つが，ところどころ流速が極端に早い部分が存在する．例えば20～40m，60m近辺に２カ所，100m近辺に一カ所である．ここでは同時に位置アンサンブルあたりの距離が大きくなっている．図-8c)はRTK-GPSから算出した橋上操作艇の移動速度を示す．橋上操作艇の移動速度は，作業員がロープを用いて橋上を歩きながら操作したため，作業員が歩く程度の早さにしかならない．ここでは0.5m/s程度である．しかしながら2m/sを超えるような場所が5カ所存在する．この位置は図-8b)で流速が早くなっている位置と同じであった．このようなことがおきている場所と図-8a)の橋上操作艇の航跡の不連続点は対応している．図-8a)b)c)から言えることは，GPSが出力する座標値が異常値を持つと，航跡が示すように極端な不連続性を示し，その座標値の時間差分から算出される橋上操作艇の移動速度も異常値となる.このため式(11)が示すように，橋上操作艇の移動速度の異常値は計測された絶対流速（流水の流速）に異常値として反映されるということである．この一連の観測でGPSのクオリティは時系列として観測当初「5(Float RTK-GPS)」，途中「1(GPS単独測位)」，最終的には「4(RTK)」となった．このような計測状況の観測結果は本来であれば「正しい観測」として採用すべきでは無いのかも知れない．しかしながら，現場における洪水観測では，電子機器を扱っている以上，あらゆる問題が起きる可能性があり，さらに洪水のピークが短時間に通りすぎる可能性もある．このような状況の中で，現場の技術者が苦労して取得したデータを不採用にするのは何とも切ない話である．次の節ではGPSの異常値が発生したと

(a) 移動速度とGPS quality indicator

(b) 移動方向とGPS quality indicator

図-9 ボートの移動方向・速度の時系列

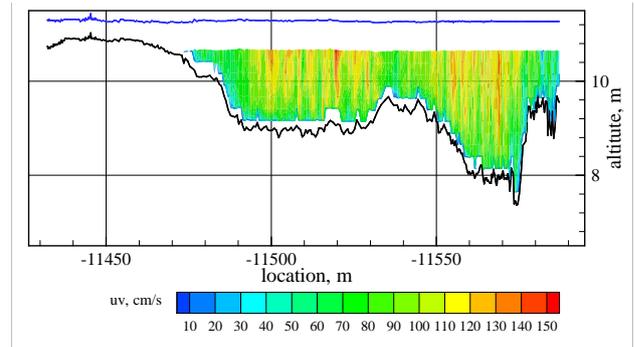
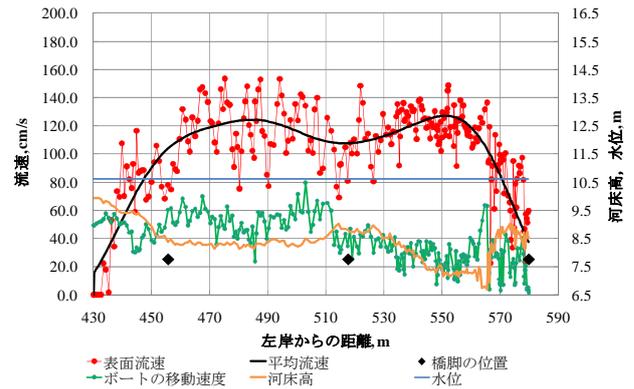
図-10 流速分布と河床高

図-11 表面流速分布

きのデータを正しい流量観測結果として採用するための工夫を説明する．

(b) VTG情報を利用することの意味

図-9(a)(b)はボートの移動方向・速度とGPS quality indicatorの時間変化を示す．これらら図-8と同じ観測結果を用いていて，その特徴的な一部を取り出した．青線が示すRTKはGPSの位置情報からそれらを時間的な差分を取りさらに時間を合わせるための平均を取っているため，かなり平滑化されている．他方VTGは生データである．両者を比較するとVTGは若干凸凹している．しかしこの凸凹加減は数cm程度であるため，数10cm程度の流速の凸凹を議論するうえでは無視できる程度である．またiGPSで示すGPS quality indicator はこの一連の区間では「5(Float RTK-GPS)」であり，約80秒と105秒に一度，「1(GPS単独測位)」になっている．このとき，RTKは速度，方向ともVTGとは大きく異なる結果となった．特に速度に関して1400cm/s程度の数字を持つが，これは前述のように歩く速度から考えると明らかに異常値である．他方，それ以外のGPS quality indicatorが「5」又は「4」のときの両者を比較するとほぼ等しい．そのときの両者の差は，数cm/s程度となった．すなわちRTK-GPSが計算する位置座標はそのときのモードにより大きく依存し，VTGはそれによらず最もらしい値を算出することが理解できた．

次にVTGとGGAを使用するときの利点と欠点を議論する．ボートの位置を把握する上で，GGAの計測精度はGPS quality indicatorが「4」である限り数cmの範囲でかなり精度が高い．VTGの場合はボートの移動速度を時間積分して位置座標を算定するため，計測を開始してからの時間が長くなればなるほど移動の方向と速度の誤差が加算され，誤差が大きくなる．一方，橋上操作艇の移動速度を計測する上で，GGAとVTGはほぼ同程度の精度があった．しかしながらVTGは必ずしも万能ではない例を著者らは経験している．著者らが頻繁に計測を行っている利根川の前橋付近[2)14)15)]における観測では，水面変動が非常に大きいことから橋上操作艇の抵抗と横断観測に使用しているワイヤーの張力のバランスが崩れ，橋上操作艇が前後に激しく動くことがあった．このとき橋上操作艇の移動速度が瞬間的に大きくなることになるが，このような状況で計測する場合，VTGの値は異常値に近い値を出力してしまうことがある．このことからVTGも万能ではないことがよく理解できる．

これらの知見を基に，日本国内においてADCPの観測にGPSを用いて行う場合の注意点を以下のように考える．a) VTG情報を出力するGPSを用いる，b) GPS quality indicatorが「1」等の値を持つときは，それが「4」になるまで待つか，橋上操作艇の位置を若干下流へ動かす等を試みる，c) 仮に計測中にGPS quality indicatorが下がることがある場合は，VTGを用いて橋上操作艇の移動速度とする．このような手法を用いて図-8(b)を描き直すと図-10になる．具体的には橘田ら[18)]が示した河川

横断方向に平行な測線への正射影を行っている．図-10が示すように図-8(b)に存在していたような極端に大きな流速分布がなくなった．また１アンサンブル毎のサイズもほぼ一定となっている．図-11は表面流速，平均流速，橋上操作艇の移動速度，河床高，水位の横断分布及び，橋脚の位置を示したものである．ここで表面流速とは鉛直方向の流速分布に対して対数則を用いて水面付近まで外挿した結果である．また平均流速の算出方法は参考文献[19]を参照されたい．

図-11が示すように河床高は左岸からの距離が430mから510mの間では2m程度，520m付近には橋脚があるためか，若干浅くなり，その後右岸へ動くに従い徐々に深くなり570mの位置で最大値である4m程度の水深を取る．ボートの移動速度は左岸からの距離が430mから510mの間では60cm/s程度であり．それよりも右岸側では，40cm/s程度である．これは作業員の歩く速度や橋上操作艇を操るロープ操作によるため若干の振動や局地的に大きな値があるものの，概ね良好である．またこの振動は後述する表面流速の振動とは大きく異なる．この図の左側（450～510mの間）と右側（520～570mの間）で表面流速の振動の様子が異なることが興味深い．左側では振動の周期が数m程度であり，振幅も±40cm/s程度となる．一方右側ではそれほど明確な周期や特徴のある振動が認められない．左側の振動と並列螺旋流の関連性は不確定であるが，河床高がある区間に一定な場所でこのような振動が顕著に出ている．またそれとは別に橋脚の背後では後流による影響か，流速が小さくなっている．

(2) 橋上操作艇

揺れにくい船艇を用意することは，確実な計測を行う上で必須項目となる．これまで著者らは複数の機会を経て，市販のトリマラン型の橋上操作艇や著者らの作成してきたモノハル型の橋上操作艇などを試行してきたが，最終的にはトリマラン型の橋上操作艇のデータ取得率が最も高い事がわかった[2]．橋上操作艇の設計には，観測地点までの運搬，現場での取り回し，使用する観測機材の重量に十分耐えうる浮力，サイドハルのバランス等，多くのパラメータが存在する．そのような中で，現地実験，概略設計，室内実験，最後の現地実験を経て，図-12に示すトリマラン型の橋上操作艇を，国土技術政策総合研究所河川研究室と共同で作成した．現地実験の概要，結果の詳細は参考文献[2]を参照されたい．ここでは結果の概略だけ述べる．

この橋上操作艇は過去に著者らが作成したモノハル型と比較するとデータ取得率が飛躍的に向上した．特に水面が波立つような状況の中で，モノハル型はその波の震動を船艇全面で受けるため，揺れが激しく，ADCPのデータ取得率が極端に低下した．WH-ADCPは傾きが15度以上になると，データを欠損とするように設計されていることが最大の原因である．一方，図-12のトリマラン型橋

図-12 著者らが作成したトリマラン型橋上操作艇

図-13 市販の高流速低揺動型曳航ボート
（ハイドロシステム開発社製）

上操作艇は，同じ実験条件において，揺れが極端に軽減された．撮影したビデオから，水面の波がメインハルとサイドハルの間から抜けている様子が明確に確認され，波の震動の影響が低減されていることが要因であると推定された．このことは室内実験でも同様の結果が得られた．なお，トリマラン型の懸案事項は，モノハル型に比較すると水面に浮遊している流下物の絡まりである．図-12が示すよう，それを防止するためにゲージを搭載している．流下物に対するゲージの効果については残念ながら確認できていないが，ゲージの流体抵抗による観測への悪影響，すなわち余分な揺れは認められなかった．

このように図-12で示す橋上操作艇の概略設計はほぼ満足のできる形となったものの，実際に同橋上操作艇の普及には少し時間がかかりそうである．今後想定されることは詳細設計であるが，これらは，観測機材の実装のための工夫，船艇の素材等の全体のバランスを鑑みると，市販の製品を有効に活用できればより望ましいであろう．

例えば図-13の高流速低揺動型曳航ボート（ハイドロシステム開発社製）は，著者らのものと設計思想が近いと考えられる．実際，高流速低揺動型曳航ボートは前述の実験と同じ条件で現地実験を行っているが，著者らが開発したトリマラン型橋上操作艇と比較しても同等又はそれ以上の性能であることを確認した．また写真右上にはADCPを含めたその他の周辺機器をまとめたユニットが示されているが，これは観測現場の作業を熟知した技術者が単純化したものである．このようなユニットを含めた橋上操作艇を用いることは，観測の準備の時間を短縮し，初期設定を的確に行うことができ，確実に観測を実施する上で非常に重要な役割を担うことになる．

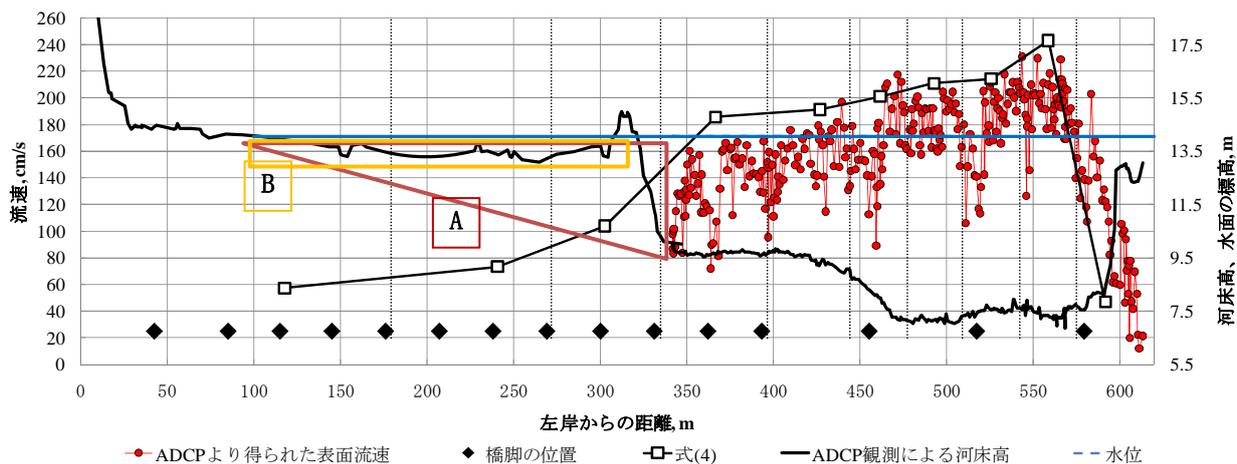



図-14 複断面開水路における流速分布の一例

(3) データ転送装置

観測を成功させる上でデータ転送装置の役割は大きい．WH-ADCPで観測を行う上で，データ転送装置は三つの役割を担う．それらは1) 観測が確実に実行されていることを確認すること，2) WH-ADCPとGPS，音響測深機等を同期させること，3) 流況や河床高をオンラインでモニタリングすることである．

最も重要なのは一つ目の項目である．本報告のADCPを用いた流量観測は複数の電子機器に依存しているため，何らかの原因で不具合が発生する可能性がある．個々の機材のみならず，ケーブルやバッテリーに至るまで，すべての構成要素が完全になって初めて正しい観測が可能になるため，観測を実行する技術者はデータの取得状況を常に観察する必要がある．観測の開始時のみならず，橋上操作艇を橋からおろして水面に着水するとき，観測中に橋上操作艇が転覆したときなど，特に橋上操作艇が大きな衝撃を受けた時，何らかの原因でデータ転送が切れる場合がある．そのようなときは直ちに橋上操作艇を引き上げ，原因を解明し修正し，再度，観測を実行しなければならない．それゆえ，データの転送状況，観測の実行状況を常に確認する必要がある．

二つ目の項目は例えばRD社が配布しているWinRiverを用いて三つのデータを同期させることである．これを行うことでデータの後処理が簡単になる．また最後の項目は，流量観測を行う上で必要であるため，それは次の章で説明する．

橋上操作艇による洪水流量観測を実施する上で，これらの課題に適切に対処できるデータ転送・処理ソフトウェアを活用する必要がある（本報告では、株式会社ハイドロシステム開発製のRemo-ADCPを使用している．）．

４．流量観測・流量換算の注意点

(1) 流量計算方法

橋上操作艇を用いた流量観測における流量値の換算に関する詳細は，参考文献[16]に詳しい説明があるが，実際に日本の河川で観測を行う上では、例えば橋田らの手法[18]が参考になる。

(2) 不感帯の扱い

ADCPの計測では複数の不感帯が存在する．これらは，ADCPが使用している音波の特性や，橋上操作艇の運航状況に起因するものである．これらの多くは，参考文献[15]で詳細に記述されているためここでは詳細は述べないが，著者らの経験による注意点だけを述べることにする．

初めに上層不感帯に関して，WinRiverUser's guide[16]は三つの手法を説明している．それらは，constant method，power method，3points methodである．上層不感帯の流量分担率は必ずしも小さくはないため，必ずどれかを使用する必要はあるが，これらの手法を用いた流量値の違いは1%程度であり，どれを用いてもそれほど問題がないように思える．しかしながら，著者らは，図-2を用いて解説した通り，power methodのような鉛直方向の計測域の流速分布全体を用いた外挿方法が妥当であると考える．すなわち，前述の通り，計測した鉛直分布は，橋上操作艇が存在すること，水面に橋上操作艇が形を持つことにより計測域上層の流速は若干の影響を受ける[8]．Constant methodや3points method はその計測域上層の計測結果だけを用いて外挿することになり，上層付近の流速を低く見積もることになりかねないからである．

次に下層不感帯に関しては，power method と constant methodが存在するが，実際の河川の流れとしてnon-slipを仮定しpower methodを適用することが妥当であると考える．

最後に左右岸の不感帯に関して説明する．これは橋上操作艇が河岸にどの程度近づけるかによる．またWH-ADCPの洪水観測における計測は1m以上の水深を持つこと

が必要となる．ここでは前述の通り，データ転送装置により流況や河床高をオンラインでモニタリングしながら川岸に近づけるところまで近づくことで，流速値，及び河床高に関して仮定を極力なくすことが望ましい．また複断面開水路での流量換算に関する注意点は次の章で説明する．

(3)複断面開水路で流量を算定するときの注意点

図-14は複断面開水路におけるADCP観測の結果の一例を示す．このとき，水位は高水敷よりも若干高い程度であった．このような状況のとき，高水敷での流速はWH-ADCPを用いて計測することが難しい．それゆえに橋上操作を低水路だけで終了させることは妥当であるが，左岸不感帯の分担流量を算出するときに若干の注意が必要となる．WinRiver におけるデフォルト設定を用いた左岸不感帯の流量換算方法は，図-14が示すAのように河床高を仮定して換算することになる．単断面水路においてこのような手法は妥当であるが，図-14の場合はかなり過大評価をすることになる．本来は同図のBが示す領域程度の河積を見込むことが妥当であろう．また領域Bにおける流速分布に関しては，前述の通りWH-ADCPの計測は容易ではない．このような場合，この測線上下流において水面勾配を計測することで，ある程度の流速値を推定することは可能であると考えられる[20]．このとき算定された左岸の分担流量は全流量の10%程度であった．

最後に流量観測を行うにあたり１測線あたりにかかる時間は，1m/s程度の歩行速度，500m程度の測線長のとき8分程度の時間を有する．洪水の流れの非定常性を考えると１往復の平均を流量値とするのが良いと考える．

5. まとめと今後の課題

本報告では，特にTeledyne RD社のADCPを用いて河川流況を計測する手法に関し，ADCPの計測原理及び計測限界，データ処理に関する注意点，周辺機器の必要性と注意点，最後に流量観測手法に関して実際に計測する技術者の目線で記述するように努めた．

これまでADCPの計測に関しては，計測に用いている大胆な仮定，流量の真値が不確定なことから，計測そのものに関して懐疑的な見方が多いように思われる．本報告，これまで著者らが書いてきた複数の文献は，著者ら自身によるものも含めてこれらの懐疑論における論点に一つ一つ応えることを主眼として書かれてきた．このため現場の計測作業において実は最も重要となる観測に関する仮定，それ故に生じる観測の限界，観測において注意すべき事項等，基本的な議論をまとめて議論することを試みたものである．もし本報告の議論が認められるのならば，橋上操作艇に搭載したADCPを用いた往復観測は，河床高の測定，三次元流速分布等，他の観測機器では得ることが難しい情報を短時間で取得することができる稀有な計測機器であると認知されるべきである．また数ある他の流量観測手法と比較して最も仮定が少ない手法であることも，もっと広く理解されて良い．

今後必要なことは，他の観測手法との比較，流量観測に関して異なる計測結果が出てきた場合の合理的な説明，流況観測における観測限界の特定とその範囲内における実河川の流況の解明（特に河道湾曲部の二次流）である．またADCPを用いた観測項目として，実河川における掃流砂量計測の試みが数多く議論されてきた[21)22)]．すなわちADCPを用いた観測では流量・流況から土砂の計測まで水文に関わる技術者ばかりでなく，河川工学者が必要な現象を理解することに大きく役立つことが期待される．

謝辞：本文で使用したADCPの観測結果は国土技術政策総合研究所河川研究室から提供を受けた．著者らの観測サイト[2)14)15)]は平水時においてもボートの挙動確認実験に適切な流れがある場所であるが，この地点は株式会社水文環境の井上拓也氏から紹介を受けた．また同観測地点での流量観測は洪水中の一級河川以上に危険であり難しい観測であったが，株式会社ハイドロシステム開発の高い技術により実行することができた．著者らの開発したトリマラン型の橋上操作艇の概略設計は大阪府立大学工学部海洋システム工学科新井励助教によるものである．最後に第一著者が国土技術政策総合研究所河川研究室に在籍していた当時，ADCP観測を始めるにあたり木下良作先生から多くの指導を受けた．記して感謝の意を表する．

参考文献

1) 木下良作：河川下流部における洪水流量観測法に関する一提案，水文・水資源学会誌，Vol.11，No.5，pp.460-471，1998.
2) 萬矢敦啓・岡田将治・橘田隆史・菅野裕也・深見和彦：高速流におけるADCP観測のための橋上操作艇に関する提案，土木学会河川技術論文集,第16巻，pp.59-64，2010.6.
3) Michael S. Rehmel, James A. Stewart and Scott E. Morlock：Tethered Acoustic Doppler Current Profiler Platforms for Measuring Streamflow, USGS Open-File Report 03-237, 2003.
4) 横尾啓介・吉田静男・岡田幸七・野村佐和美：感潮域におけるＡＤＣＰを用いた河川流量の推定,水工学論文集，第52巻，pp.931-936，2008.2.
5) 金子新，伊藤集通：ADCPの普及と海洋学の発展，海の研究，Vol.3，No.5，pp.359-372，1994.
6) Michael R. Simpson：Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler, USGS Open-File Report 01-1, 2001.
7) 例えば椿東一郎：水理学I，基礎土木工学全書6，森北出版，1973

8) David S. Mueller, Jorge D. Abad, Carlos M. García, Jeffery W. Gartner, Marcelo H. García, and Kevin A. Oberg: Errors in Acoustic Doppler Profiler Velocity Measurements Caused by Flow Disturbance, J. Hydr. Engrg. Volume 133, Issue 12, pp. 1411-1420, December 2007.
9) 例えばHendrik Tennekes,John Leask Lumley: A First Course in Turbulence, massachusetts institute of technology, 1972.
10) Atsuhiro Yorozuya, Sachio Shintaku, Keizo Ejima, Kazuhiko Fukami, and Hirokatsu Kanazawa, Development of a sediment discharge measurement system with ADCP, 10th international conference on Fluid control, measurements, and visualization (FLUCOME 2009), August 17-21, 2009, Moscow, Russia, full paper in CD-ROM
11) 萬矢敦啓，岡田将治，江島敬三．菅野裕也，深見和彦：ADCPを用いた摩擦速度と掃流砂量の算定手法,水工学論文集，第54巻, pp1093-1098，2010.2.
12) 萬矢敦啓・宇野哲平・木下良作・山下武宣：ADCP 観測値を用いた新たな試み～高度処理について～，土木学会第62回年次学術講演会，2-104，pp. 207-208，2007.
13) 岡田将治，橘田隆史，森本精郎，増田稔：ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測，水工学論文集，第52巻，2008.
14) 岡田将治，萬矢敦啓，橘田隆史：ADCP搭載ボートの観測時の揺動が流速分布および水深計測値に及ぼす影響，水工学論文集，第54巻，pp.1087-1092, 2010.2.
15) Shoji Okada, Atsuhiro Yorozuya and Takashi Kitsuda; Effect of Fluctuation of a Moving Boat Equipped with ADCP on Velocity-Profiles and Water-Depth Measurements, 33rd International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR) congress, August 9-14, 2009, Vancouver, Canada, full paper in CD-ROM
16) RD instruments; WinRiver User Guide (www.adcp.com)
17) 測地衛星技術株式会社（http://www.gnss.co.jp）
18) 橘田隆史，岡田将治，新井励，下田力，出口恭：ラジコンボートを用いたADCP移動観測の計測精度評価法に関する一考察，河川技術論文集，第14巻， pp.295-300, 2008.6.
19) Yorozuya,A.,Fukami,K.,Shibata,N.,Kanno,Y.,and Imamura,H.; Flow characteristics in actual river based on field observations using ADCP, The Second International Symposium on Shallow Flows(ISSF2008), Hong Kong, 10-12 December, 2008. Abstract on p49; full paper in CD-ROM
20) 萬矢敦啓・大平一典・菅野裕也・深見和彦：非接触型電波式流速計を用いた洪水流量自動観測手法の一考察，土木学会河川技術論文集, 第16巻，pp. 53-58，2010. 6.
21) Rennie, C.D., Millar, R.G., and Church, M.A.: Measurement of bedload velocity using an acoustic Doppler current profiler. J. Hydraulic Engineering, 128(5):473-483, 2002.
22) Atsuhiro Yorozuya, Shoji Okada, Yuya Kanno, and Kazuhiko Fukami: Bed-load discharge measurement by ADCP in actual rivers, River flow, 2010.9.　Accepted

（2010. 7. 20受付）

ADCPを利用した流況・流量観測事例
～内川と黒部川～

EXAMPLE OF FLOW REGIME AND DISCHARGE OBSERVATION
USING THE ADCP IN THE UCHIKAWA AND THE KUROBEGAWA

手計太一[1]
Taichi TEBAKARI

[1]正会員　博(工)　富山県立大学講師　工学部環境工学科（〒939-0398 富山県射水市黒河5180）

This paper reports the example of the flow regime and discharges observation in the Uchikawa and the Kurobe River using the ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler).

The Uchikawa had been rich and varied river until 42 years ago. Water environment in the Uchikawa has been deteriorated caused by new port construction and well-drained paddy field development. Sanitization program for the Uchikawa has been carried out by national and local government. However, water environment in the Uchikawa did not reach to drastic improvement. In this study, flow regime in the Uchikawa was observed using the ADCP. As a result, the Uchikawa was effected by seawater regularly.

In order to estimated exchange between river discharge and groundwater, simultaneous measurement of river discharge was carried out using the ADCP in the Kurobe River. In this paper, observation method was reported in detail.

Key Words : *ADCP, flow regime observation, discharge observation, Uchikawa, Kurobegawa*

1．はじめに

欧米ではほぼ一般的になってきているADCP(超音波ドップラー多層流向流速計)は，我が国おいては，近年になってようやく，研究現場のみならず，実務の現場においても広く普及しつつある．

筆者は幸運にも縁があって超音波ドップラー多層流向流速計(ADCP; Teledyne RD Instruments社製)を購入することができた．これまでもADCPを利用した観測現場には居合わせていたが，いざ自分自身で全ての観測をしなければならなくなったとき，様々な問題に直面した．測定原理を理解していたとしても，実際に"使う"ためには現場に応じた必要な人員や備品などを考えなければならない．

本稿では，ADCPを利用してどのような河川でどのような流況・流量観測を実施し，どのような問題が発生し，どのように解決したのかを詳述する．

2．感潮域における流況観測

庄川右岸の河口部に位置する内川は，昭和42年よりの乾田事業や昭和43年の富山新港建設にともない内川本川や支川の流れがほとんどなくなり，生活排水や工場排水によって河川水質は極端に悪化した．このような問題を解決するために，昭和55年より内川浄化対策事業が実施されてきた[1),2),3)]．ある程度の水質改善は認められたものの，抜本的な水環境の改善には至っていないのが実情である．

そこで著者らのグループは，ほとんど観測事例のない内川を対象に，水質・底質，生物，水理の3項目について集中的に観測を実施した．本稿では，ADCPを用いて実施した流況・流量観測について報告する．

(1) 観測対象河川：内川

内川は旧新湊市街(現在，射水市)の中心部を東西に流れる2級河川である(図ー1)．流路延長は2.2km，揚水機場から奈呉ノ浦までの西内川は0.7km，富山新港から奈

図–1　内川の概要

図–2　奈呉ノ浦水位観測所における内川の水位と富山湾の潮位の時系列

呉ノ浦までの東内川は1.5kmである．かつては，放生津潟を源流に奈呉ノ浦や庄川まで流れ，豊富な水量や良好な水質を保ち，非常に良い漁場であった[4]．しかし，昭和43年の富山新港の建設に伴い，源流であった放生津潟は直接日本海と繋がることになった．**図−2**は**図−1**中の奈呉ノ浦水位観測所における内川の水位と富山湾の潮位の時系列である．この図からわかるように，通年で富山湾の潮位の方と内川の水位よりはほとんど同じである．そのため，内川には流れがほとんどなくなり，水環境は悪化していった．その後の浄化対策事業によって，西内川には庄川からの浄化揚水(最大2m³/s)によって日中(9時〜17時)だけは流れが戻ってきているが，東内川には流れがほとんどないのが実情である．

(2) 観測方法

内川においては，河川縦断方向の移動流況観測，定点観測，流量観測を実施した．それぞれの詳細を下記に示す．なお，いずれの観測においても，ADCPの計測設定は**表−1**の通りである．

a) 河川縦断方向の移動流況観測

本研究以前に内川の流況を詳細に研究した例は全くないため，河川全体の流況を知るために，河川縦断方向に移動観測することを考えた．内川は，両岸を綺麗に整備したために，自然の障害物は少ないものの，橋梁や電灯など人工的な障害物が多い．また，前述したように，内川は奈呉ノ浦を境に西内川と東内川に分かれており，西内川と東内川を連続で観測することが難しい．

そのため，まず両岸からロープでADCPを曳航する方法を採用した(**写真−1**)．曳航者3名(右岸2名，左岸1名)，無線を利用したデータ取得のため，河川沿いに車を並走させPCでデータチェックをする者1名の合計4名で実施した．観測する前に，障害物箇所におけるロープの受け渡しの方法などを入念に練習した．また，曳航するといっても，強制的に引っ張るのではなく，自然の流れに任せて曳航するのがコツである．内川は不法係船が非常に多く，不法係船をクリアしていくことが本方法の最大のネックであった(**写真−2**)．

表−1　ADCPの計測設定

Workhorse ADCP 1200kHz			
計測モード	WM11	ボトムトラック機能	ON
計測層厚	0.05m	ボトムピング数	3
計測層数	50	固定観測における流速誤差の標準偏差	0.77cm/s
アンサンブルタイム	1.54s	計測コーディネーション	アースコーディネイト
ウォーターピング数	3		

本方法を何度か試みたが，結果的に，本対象河川では良い方法ではなかった．その理由の一つとして，障害物箇所におけるロープの受け渡しで，所々，ADCPを強制的に引っ張ってしまうことがあり，データを取得できないところがあった．さらに，ロープが係船に引っかかるなど，安定的な観測はできなかった．曳航者を障害物の箇所だけ増やせばもっと安定的な観測は可能であったろうが，スタッフや学生数に限りがある以上，他の方法を検討しなければならなかった．また，東内川は川幅が最大25mあり，中型の漁船が係船していることもあり(**写真−3**)，内川全体にわたる縦断観測はできなかった．

次に，少人数でも内川全体の縦断観測を可能にしたのはゴムボートによる曳航である．しかし，学生がゴムボートの操縦をしたことがなく，安全上からも学内の池で練習する必要があった(**写真−4**)．ボート曳航の場合，ボートの速度を一定に保つことが重要であった．順流の場合は流れに沿って河川中央を航行するようにコントロールするだけで良いが，逆流の場合は一人で約50分継続して漕ぐ必要があり，体育会系学生でもヘトヘトになる運動である(**写真−5**)．この場合の観測においても，ADCPのデータは無線で送っているため，ボートと並走した車に登載したパソコンでデータを受信し，確認しながら観測ができる．しかし，場所によって車が並走できない場合があり，データ受信できないことがあった．その

写真-1　河川縦断移動観測風景(西内川)

写真-2　河川縦断移動観測中の障害物(西内川)

写真-3　漁船と不法係船(東内川)

写真-4　学内の池での漕艇練習風景

写真-5　ボート曳航式移動流況観測(東内川)

写真-6　ボート曳航式移動流況観測(奈呉ノ浦付近)

ため，**写真－6**のように好天時にはボートにデータ受信用のパソコンも搭載して観測を実施した．ゴムボートの取扱説明書には4名乗船できると記載されているが，大人が船上でも作業するとなると3名が限界であった．い

写真-7　障害物を潜りながらのボート曳航式移動流況観測

写真-8　西内川・藤見橋における定点観測風景

写真-9　東内川・内川緑地における定点観測風景

写真-10　東内川・神楽橋における定点観測風景

ずれのボート観測においても，1名の学生が徒歩もしくは自転車でボートと並走し，ボート転覆などのトラブルに備えた．西内川では，**写真－7**のように河川を横断する導水パイプが観測の障害になる場合もあった．

ボート観測における問題点は，内川では漁船，不法係船と定期観光船が行き来しているため，事前に航行時間を調整しなければならない．出漁や観光船の時間は事前にある程度把握できるものの，不法係船の出入りは全くわからない．船舶と出合った場合には観測を中断し，流況が定常状態になることを確認してから再度観測を始める必要がある．感潮域では船舶の行き来が多いため，潮位の状態から観測日時を設定しても，実際に観測できるか否かわからないことがあった．しかし，観測を定期的に続けていると，漁師さんたちや地元の住民と話をすることが増え，数ヶ月もすれば，漁船やプレジャーボートの方が避けてくれることが多くなった．実際に利用している地元住民や漁師さんとの信頼関係は非常に重要であると痛感した．

b）定点における流況観測

前項で紹介した移動観測では河川流況の全体を把握することはできものの，時間的変化はわからない．そこで，西内川と東内川のそれぞれにおいて河川中央にADCPを設置し，24時間の定点観測を実施した．**写真－8**は西内川・藤見橋における定点観測風景，**写真－9**は東内川・内川緑地における定点観測風景である．長時間の観測には電源は欠かせないものである．河川沿いに公用の電源を探すのは一苦労する．西内川には市や県の所有する電源はなく，バッテリーを準備する必要があった．最近はレジャー用に利便性の高いバッテリーが販売されているが，著者らのグループはiFONIX社製のPower Combo PG-421を利用している．少し余計な機能もあるものの，長時間の利用ができることやAC電源が使えるなど，痒いところに手の届くバッテリーである．一方，東内川においては，偶然にも近くに公共トイレがあり，そこから電源を使わせてもらえるように射水市から許可を得た．それでも200mほど配線をしなければならない．50mの延長コードを利用しても4つ利用する必要があった．延長コードと延長コードの接続部が離れないように，そして濡れないように細心の注意が必要である．これだけ細心の注意を払っても，一度だけ電源が落ちたことがあった．公共トイレの電源の点検があり，業者が市に確認せずに切ってしまったのである．もちろん，常にデータを確認していたし，トラブルに対応できるような体制を整えていたため，欠測は5分程度で済んだ．

どんな観測でもそうであろうが，観測中にトラブルが起きることを想定した対策を立てることが重要である．観測計画を完璧に立案することは可能であるが，非常時にどれだけ対応できるかが，観測を成功させる秘訣であろう．観測中に自然現象を常に観察していることは当たり前だが，観測機材のトラブル対応のためには観測参加

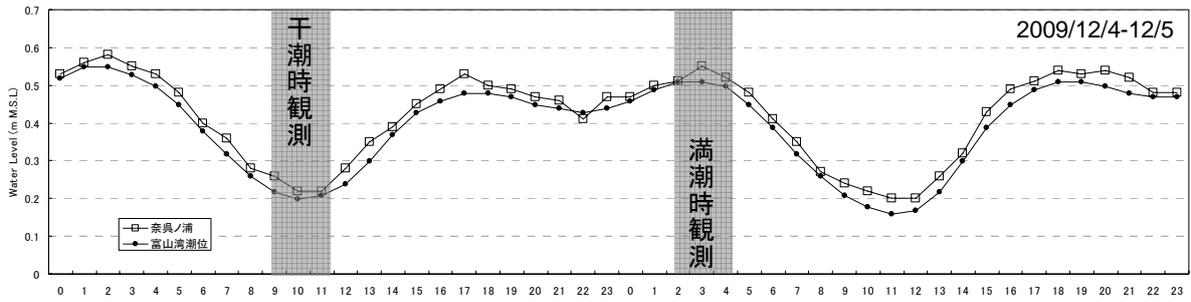



図-3　2009年12月4日から5日の奈呉ノ浦の水位と富山湾の潮位の時系列

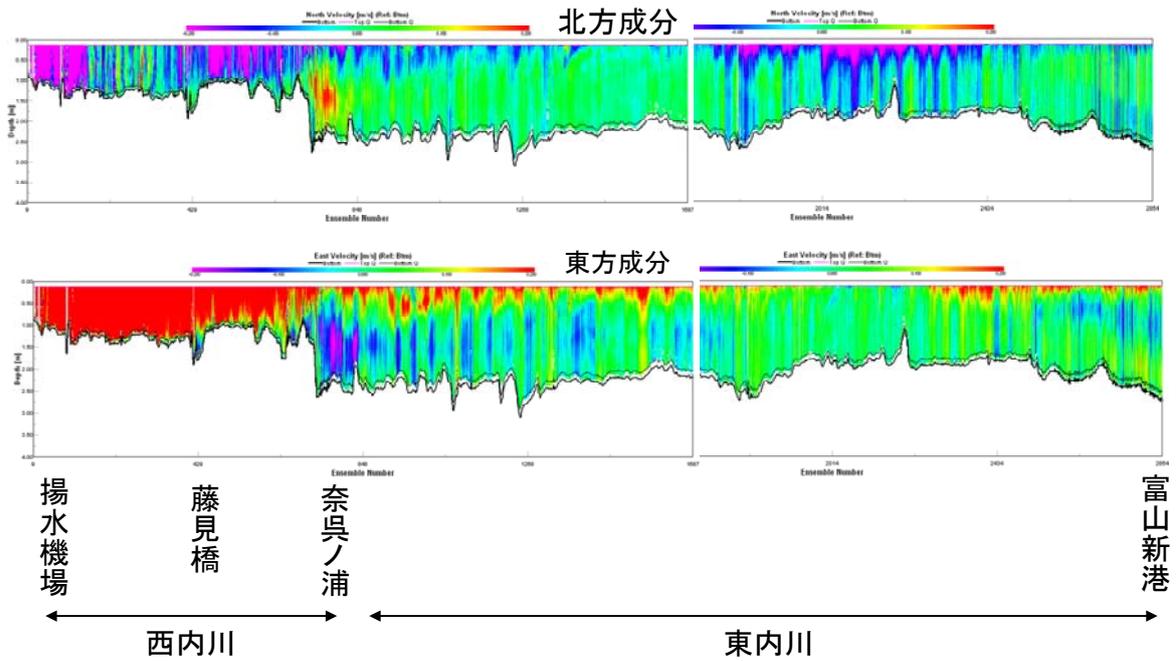



図-4　干潮時における揚水機場から富山新港までの河川流況観測の結果

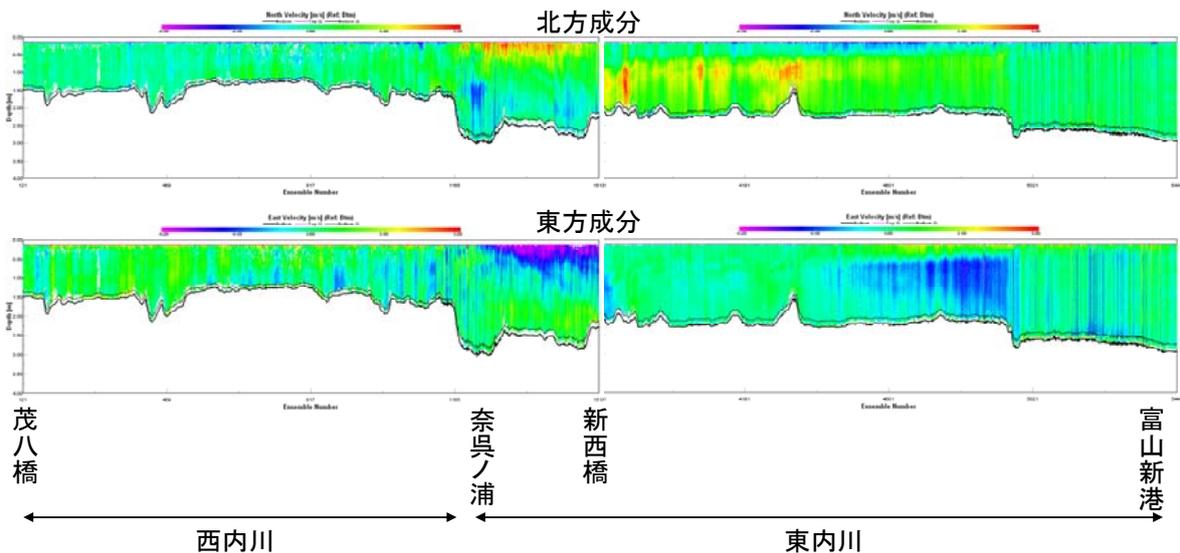



図-5　満潮時における茂八橋から富山新港までの河川流況観測の結果

者全員が機材をマスターし，電源一つ一つの配線にまで各人がチェックしておくことで参加者全員が有機的に行動しトラブルを解決に導くであろう．

c）流量観測

感潮域での流量観測は非常に難しいことは良く知られている．しかし，ADCPは断面を多層に流向・流速を計測することができるため，試験的に東内川・神楽橋において流量観測を実施した．その様子を**写真－10**に示す．写

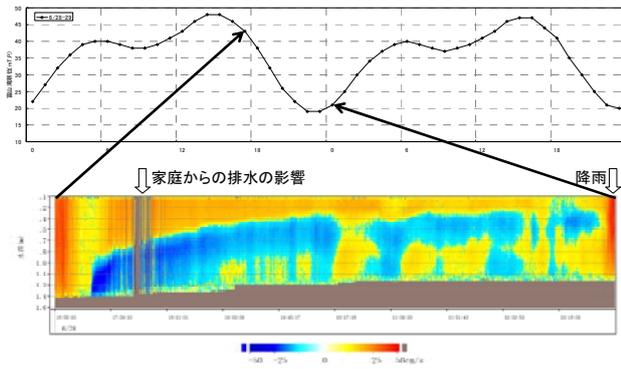



図-6　西内川・藤見橋における流況観測結果の一例

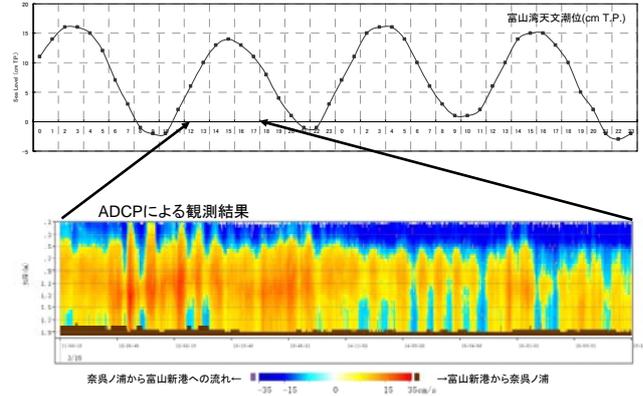



図-7　東内川・内川緑地沿いにおける流況観測結果の一例

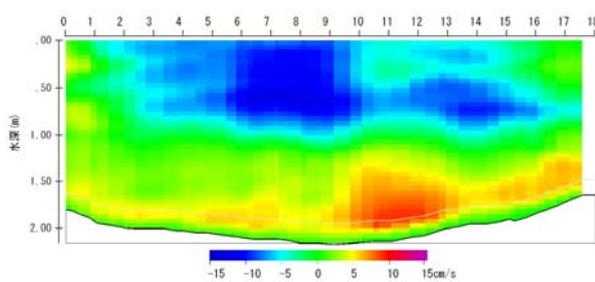



図-8　神楽橋における流量観測断面図の一例

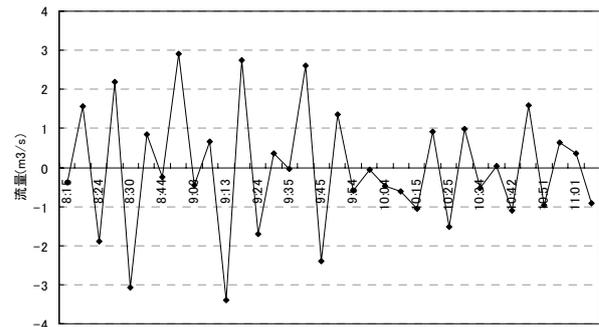



図-9　神楽橋における流量の時系列

真のように，両岸からロープでADCPを引くだけである．川幅20mを約3～5分程度で観測する．2往復実施することで，4回の流量値が観測できる．両岸に1名ずつ，モニタリング1名の合計3名で観測を実施した．単純に”引く”だけでは精緻なデータを取得することはできない．両者がきちんと引っ張り合いながら河道とは直角になるようにすることがコツであり，曳航速度は速過ぎず遅すぎないことが重要である．もちろん，測線によっては，ワイヤ等で導線を設置し，それに沿ってADCPを曳航させれば良いが，実際の現場はそのように恵まれた環境ばかりではないのが実情である．なお，**写真－10**のように，車に無線設備を登載し，PCでモニタリングしながら観測を実施した．

(3) 観測結果

a) 河川縦断方向の移動流況観測の結果

本稿では2009年12月4日から5日にかけて実施した移動流況観測の結果を示す．観測を実施した時間帯の富山湾と奈呉ノ浦の水位を**図－3**に示す．

図－4は干潮時における揚水機場から富山新港までの河川流況観測の結果を示している．上段は北方成分の流速分布，下段は東方成分の流速分布であり，色の凡例における赤系色は正の流速，青系色は負の流速を表している．朝9時から夕方5時まで，庄川から取水した水を揚水機場から流下させている．そのため，西内川は揚水機場から奈呉ノ浦まで東方成分の流速に支配されている．最大で約0.8m/sの流速がある．また，奈呉ノ浦から約260m上流に位置する藤見橋付近までの下層で逆流が観測された．これは奈呉ノ浦からの塩水の遡上が推察される．このような逆流は他の観測日においても確認している．奈呉ノ浦では，中層部で北方成分の流速が観測された．西内川と東内川から日本海へ流出している流況と考えられる．

東内川に着目すると，全体的な傾向として奈呉ノ浦から富山新港へ流れている．特に表層部(約50cm)は，最大で0.2m/s程度の流速で奈呉ノ浦から富山新港方向に流れている．また，表層より下層では，流速0.1m/s以下の極めて遅い順流と逆流が混在した流れが観測された．この要因は上流端と下流端のいずれもが潮位の影響を強く受けているからと考えられる．

図－5は満潮時における茂八橋から富山新港までの河川流況観測の結果を示している．図の詳細は**図－4**と同様である．満潮時は茂八橋に障害物があるため，揚水機場～茂八橋間の流況観測は実施していない．西内川の茂八橋～奈呉ノ浦までの間，流速0.1m/s以下の極めて遅い順流・逆流が混在した流れが支配している．奈呉ノ浦の表層部では流速が0.15m/s程度で日本海に流出する流況が観測されているが，下層部は流速0.1m/s以下の非常に遅い逆流が観測された．東内川全体にわたって，流速が0.1m/s以下の非常に遅い順流と逆流に支配されており，流れはほとんどない．満潮時にあたり，上下流端が潮位の影響を受けているため，このような流況になるものと考えられる．

b) 定点における流況観測の結果

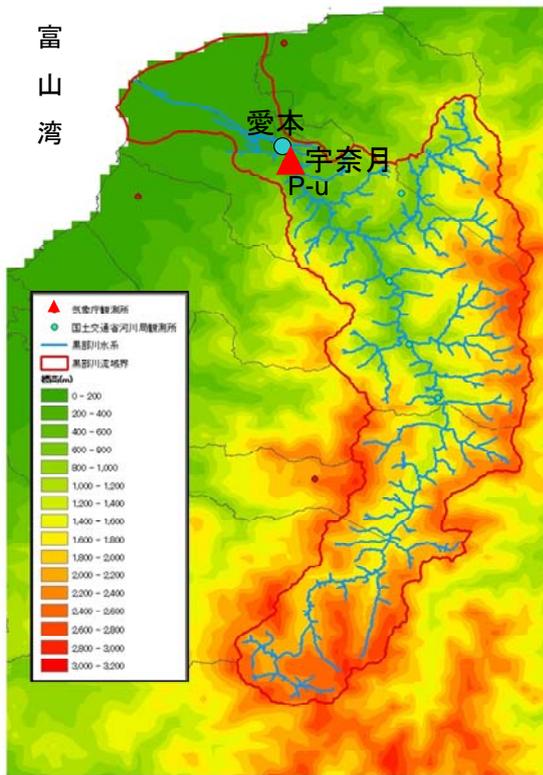



図-10　黒部川水系と流域界

西内川・藤見橋における流況観測結果の一例(2010年6月28日)を**図－6**に示す．図中上は富山湾の天文潮位の時系列であり，流況観測を実施した時間帯を示している．下図は流下方向を正にとった流速分布の時系列である．黄色から赤色系は正，青色系は負を示し，灰色は河床である．先述したように，17時までは浄化揚水機場からポンプ排水されており，0.8m/s程度の流速が観測された．ポンプ排水が停止すると，奈呉ノ浦から塩水が遡上してくる．17時30分頃から楔状に塩水が遡上してくるのが観測された．これまでの定期的な観測から，上げ潮と下げ潮，富山湾潮位の状況に応じて，塩水の浸入形態が異なることがわかってきている．

東内川・内川緑地沿いにおける流況観測結果の一例(2009年3月16日～17日)を**図－7**に示す．図中上は富山湾の天文潮位の時系列であり，流況観測を実施した時間帯を示している．下図は流下方向を正にとった流速分布の時系列である．黄色から赤色系は正，青色系は負を示し，茶色は河床である．河川台帳上，富山新港が上流端であるので，富山新港から奈呉ノ浦への流れを順流(正)と表示している．大きく分類すると，表層は逆流，下層は順流れとなっている．また，先述したように上流端・下流端ともに富山湾と接続していることで，順流と逆流が周期的に発生している．

c) 流量観測の結果

図－8に2010年1月22日に実施した流量観測の結果の一例を示す．同日午前8時13分11秒から8時15分26秒までの2分13秒間に観測した観測断面図である．**図－7**と同様に上層と下層で流れが逆であることがわかる．流量を算出すると-0.375m^3/sであった．同日に実施した流量観測の結果を**図－9**に示す．これまでに示したのと同様に，流量の値としても正負が混在する時間変化を示している．

図-11　黒部川における流量観測地点

３．黒部川における同時流量観測

地下水の失水量や得水量を評価する手法の一つとして，同時流量観測が挙げられる．その名称の通り，複数断面において同時に流量観測し差分を取ることで，失水量や得水量が算出できる．既往事例の多くの場合，本当に同時ではなく，低水時もしくは平水時に河川が定常であるという仮定の下，一日ないしは二日間程度かけて複数断面における流量観測を実施している．

著者らは黒部川の失水量・得水量を算出するために，本当の同時流量観測，要するに全く同時に複数断面の流量観測を実施している．それを可能にしたのはADCPであった．しかし，実際に観測に着手すると様々な課題が見つかった．本稿では，まだ試験段階であるもののADCPを利用した同時流量観測の方法と結果について概説する．

(1) 黒部川

図－10は本研究対象である黒部川水系と流域界である．本稿では黒部川扇状地も黒部川流域内として流域界を描いている．黒部川は北アルプスのほぼ中央に位置する鷲羽岳を源とし，3000m級の山々が連なる立山連峰と後立山連峰を流域にもつため，平均河床勾配が1/5～1/119という我が国屈指の急流河川の一つである．深い峡谷を流下し，黒部ダム，仙人ダム，小屋平ダムを経て宇奈月町に達する．宇奈月から下流の川幅は広くなり，大きく蛇行しながら愛本にいたる．愛本には1932年に建設された合口頭首工があり，両岸に広がる扇状地に向けて灌漑用水が取水されている．右岸に7用水，左岸に6用水を合口し，最大取水量は75.4m^3/sである[5]．

黒部川は宇奈月町愛本で山間地から平野部に抜け，そ

写真−11　各断面における流量観測風景（写真上段：断面①，中断：断面②，下段：断面③）

写真−12　ADCPを搭載したリバーボート

写真−13　ADCPを搭載した高速セーフティサーベイヤー

写真−14　釣竿を利用した測線の作成

こから黒部市，入善町にかけて黒部川扇状地と呼ばれる美しい扇状地を形成している．この大扇状地を抜けると富山湾にいたる．黒部川の幹川流路延長は85km，そのうち83.5％を占める71kmは山地を流れ，残り14kmは平地を流下している．流域面積は682km^2，そのうち97.1％は山地である．

黒部川流域は全国有数の多雨多雪地域であり，流域の年平均降水量が非常に多く，平野部にある黒部市では約2300mm，中流部にあたる宇奈月では約3500mm，上流部にある仙人谷観測所では約4000mmの降水量がある．

黒部川扇状地は山間部から抜け出た河川が河床の傾斜が緩やかになることによって，流れも緩やかになり，土砂が堆積して形成された地形である．黒部川の扇状地は上流の花崗岩地帯から流出してきた透水性の良い土砂を含むため，黒部川の水が伏流水となって地下水を涵養している．したがって，この扇状地では黒部川の伏流水を水源とした湧水がいたるところで湧き出ている．

黒部平野の地形は，扇状地東側の愛本新から金山にかけて旧扇状地からなる砂礫台地が分布し，その西端では崖を形成し新扇状地と接しており，この台地の東側には小川流域の平野がある[6]．一方，扇状地の南側には下立から浦山にかかる部分と前沢周辺とに砂礫からなる洪積台地が分布しており，その背後にはかなり開析の進んだ高位の砂礫からなる洪積台地がある．

(2) 観測方法

図−11は同時流量観測を実施した観測断面を示している．図中の数字は河口からの距離を示している．断面①と断面②の間の距離は2.3km，断面②と断面③の間の距

離は2.7kmである．それぞれの区間の流量変化を捉えようという試みである．いずれの地点においても，河床勾配は約1/90であり，非常に急峻である．

観測断面の設定は，愛本堰堤から下流の全区間を踏査し，河道が一本であることが前提とした．黒部川下流域は河道が何本にもなっており，流量観測に適する場所が少ないのが実情である．また，橋梁から観測できる箇所がなかったため，両岸からそれぞれ曳航する方法を採用した．そのため，最大でも川幅は50mが限度であると判断した．以上の理由から，上述の3地点を選定した．

それぞれの断面における観測風景を**写真－11**に示す．写真から容易にわかるように，断面②は平水時にもかかわらず大きく波立っている．この断面の平均的な表面流速は3～4m/s程度と非常に高速であった．断面①，断面③においても，1～2m/s程度の流速があり，一般的な河川と比較して非常に高速であった．また，いずれの写真にもあるように，両岸で2名ずつがロープを引いている．極めて大きな体力を要することは容易に推察できるであろう．

写真－12は断面①と断面③で利用したADCPを登載したリバーボートである．ボート先端に着目すると，テーピングしていることがわかる．これは，速い流速の場合，このように対処するとボートが跳ねることなく精度良く測定することができる．このようにしないと，曳航ロープが引っかかり，ボートが転覆する．転覆自体は大きな問題でないが，観測が中断されデータが欠測するため，避けたい問題である．このような速い流速でも安定的に観測できるボートが販売されている．**写真－13**は断面②で利用した高速セーフティサーベイヤー(㈱ハイドロシステム開発)である．断面②においては，**写真－12**のように一般的なリバーボートを多少なりとも工夫しても転覆してしまった．そのため，上述の高速用のボートを利用した．高速セーフティサーベイヤーを利用することによって，データの取得率が格段に向上した．

実際の観測において，断面①と断面③では無線を利用したモニタリングをしながらの観測，断面②では内臓記録を利用した観測を実施した．両者には利点・欠点がある．観測者とすれば，やはりモニタリングしながら観測することで，データ取得の安心感や実際の流況を確認しながら設定を変更するなど柔軟に対応できる．しかし，本観測では観測者が限定的であったため(予想以上に流速があり，ADCP自体をコントロールすることに人員を割かれた)，測定開始スイッチの位置と観測場所が少し離れていただけで，観測者に大きな負荷をかけてしまった．一方，内臓記録を利用する場合，一々パソコンにデータを吸い上げ，データ取得を確認しなければならない．もちろん，自信があれば確認せずに終日観測をし続ければ良い．今回の場合は，二回の観測後に一度だけデータ確認を行い，その後は観測終了までデータの確認は行わなかった．もちろん，無事に全てのデータは記録されていた．このような不安がある一方で，少ない人数でも観測できる手法でもある．ADCP自体のスイッチのON/OFFだけで良いので，観測者が観測位置から少しも離れる必要がない．本観測において，最もトラブルの少なかった断面であった．

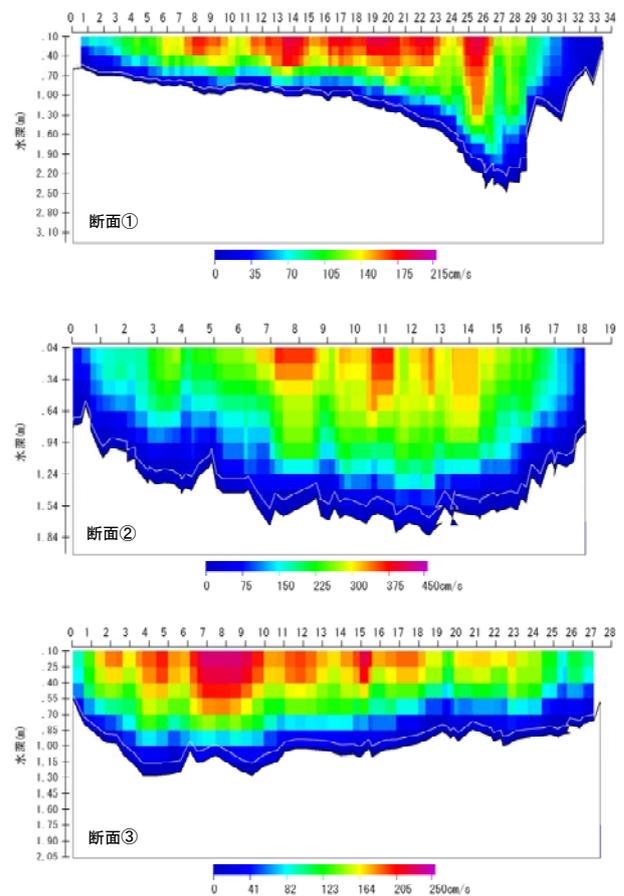



図-12　12時に観測した各断面の流速分布

本観測中に最も多かったトラブルは，ロープが破断することであった．合計で4本の測量用ロープが破断した．測量用のロープは目盛りが付いているため，ADCPの接岸距離などが瞬時に記録できるので利用していたが，予想を超える流速だったため，測量用ロープでは容易に破断してしまったと思われる．結局，全ての断面でいわゆるトラロープ(タイガーロープ)を利用した．ただし，ロープが水に濡れると，多少滑りやすくなるという難点もあった．

最後に，観測前の準備として各断面で測線を作らなければならない．要するに最大で川幅50mの河川にロープを渡さなければならない．著者らは，釣竿を利用してロープを渡した．その様子が**写真－14**である．実際の観測以前に，何度かこの手法を試している．奇遇にも釣りを趣味とする学生がいたため，釣竿や釣り糸の種類などを選定してもらい，確実にできることを確認してから実際に実施した．しかし問題もある．素人では50mといえどもそう易々と錘を飛ばすことができないことである．

釣り好きの学生が卒業・修了してしまうことを考えると来年度以降の観測が不安である．

(3) 観測結果

図－12に断面①，②，③において12時に観測した断面流速分布を示す．いずれの断面においても，表面付近の流速は2m/sを超えており，平水時にもかかわらず流速が非常に速いことがわかる．特に断面②は4m/sを超える流速が観測されている．本図を作成するに際し，特にこのような現場では航跡が湾曲するため，直線になるような補正と航跡直交成分の流速値を算出するように補正している．ただし，本図は右岸と左岸の補正をしていない．流量を算出するためには，両岸の流速を補正する必要がある．補正後のデータについては別稿で報告したい．両岸の流速を補正していない流量の時系列を**図－13**に示す．毎時約20分間に4回の観測を実施したが，最大で約18m/sの違いが観測された時間帯があった．本観測結果のさらなる精査については今後に期待していただきたい．

4．最後に

幸運にも異動先でADCPを購入していただいた．筆者が思っていたよりも様々な用途があることがわかった．以前からADCPには触ったことがあり，観測現場もわかっていた．しかし，いざ自分が全てをやらなければならなくなったとき，多くの問題に直面した．最大の問題は人員であった．一見して観測が容易に見られがちだが，現場によっては非常に多くのスタッフが必要であった．また，データ解析も難しい．簡易に大量のデータは取得できるが，現場に応じて一つ一つのデータ精査が必要であった．しかし，ADCPには大きな未来を感じる．今までわからなかった河川の流動がわかるようになる．そんな現場がたくさんある．筆者はADCP原理主義者ではない．現場に応

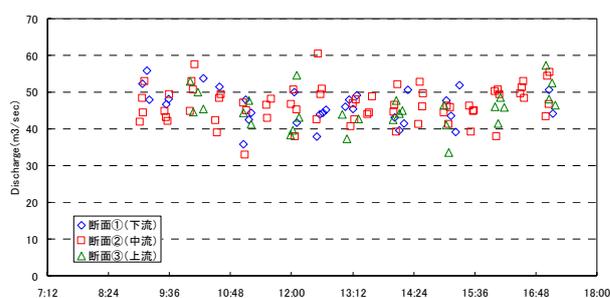



図-13　各断面の流速の時系列(両岸の補正無)

じて最新の技術を導入し，自然現象を理解し，水災害緩和・防止や水環境の改善に役立てれば良い．本稿では，ADCPが役に立った現場を紹介した．様々な技術が競い合いこの分野が発展することを期待する．

謝辞：内川における観測では富山県立大学短期大学部の学生諸氏の協力を得た．黒部川における観測では中央大学河川・水文研究室の学生諸氏の協力を得た．合わせてここに記して謝意を表します．

参考文献

1) 北陸地方建設局：内川浄化事業計画書，1976.
2) 新湊市，高岡市：内川流域浄化対策検討委員会報告書，1991.
3) 北陸地方建設局：内川流域浄化用水導入計画について，1996.
4) 布本博，高瀬信忠：内川河川(富山県新湊市)の水理模型実験に関する研究，石川工業専門学校紀要，第25号，pp.87-94，1994.
5) 富山県立大学工学部環境工学科編：新富山の水環境，(有)TC出版プロジェクト，2009.
6) 藤井昭二：黒部川扇状地の形成と富山湾周辺部の埋没林について，地球科学，78，pp.11-20，1965.

(2010.7.20受付)

河川音響トモグラフィーシステムによる 河川流量の自動計測

AUTOMATIC MEASUREMENTS OF STREAM FLOW USING FLUVIAL ACOUSTIC TOMOGRAPHY SYSTEM

川西　澄[1]・金子　新[2]・江田憲彰[3]・児子真也[4]
Kiyosi KAWANISI, Arata, KANEKO Noriaki GOHDA and Shinya NIGO

[1]正会員　工博　広島大学大学院准教授 工学研究院社会環境空間部門（〒 739-8527 東広島市鏡山 1-4-1）
[2]正会員　工博　広島大学大学院教授　工学研究院社会環境空間部門（〒 739-8527 東広島市鏡山 1-4-1）
[3]正会員　理博　共同代表　水環境モニタリング有限責任事業組合（〒 723-0047 広島県三原市青葉台 12-2）
[4]正会員　流域調査係長　国土交通省中国地方整備局河川部河川管理課（〒 730-8530 広島市中区上八丁堀 6-30）

Discharges of a tidal river and a gravel-bed river were measured using an innovative technology called Fluvial Acoustic Tomography (FAT). Reciprocal sound transmission was performed between two acoustic stations located on both sides of rivers. The FAT system makes a breakthrough with the following aspects: (a) accurate time with GPS clock signals, (b) high signal-to-noise ratio with 10th order M-sequence modulation, (c) deducing cross-sectional average velocity from multi-paths that cover the cross-section, (d) low power consumption, small and lightweight. Even for a tidal river with periodic intrusion of salt wedge, the river discharges of the FAT system were in good agreement with the discharges observed by an array of ADCPs. The discharge measurement by the FAT system was carried out successfully even in flood events with high suspended sediment concentration and large ambient noise levels of sound. The discharge of the FAT system also agreed well with the results of the ADCPs and the float observations during the flood events.

Key Words: *acoustic velocitimeter, acoustic tomography, discharge, saltwater intrusion, tidal estuary, gravel-bed river*

1．はじめに

治水・利水および河川環境の整備と保全のために，省力型で安全・確実な河川流量観測技術の確立は喫緊の課題の一つである．水位の測定は流速測定と比べると遙かに容易であることから，最も広く使われているのが水位から間接的に流量を推定する *H-Q* 法であるが，水位から流量が一義的に決まらない場合には使えない．直接的に流量を求めるには，断面平均流速を測定する必要があるが，これは特に洪水時には大変難しく，ADCP による横断観測[1)]や H-ADCP の移動測定[2)] を除けば，断面内の流速測点の数や配置は不十分である場合がほとんどである．そこで，何らかの方法で断面内の流速分布を推定し，限られた流速測点から流量を求めることが考えられており，これまでに，数値解析による方法[3,4)] や情報エントロピーの考えに基づく方法[5)] が提案されている．また，横断面内に，単位幅流量と全断面流量の相関が高くなる場所が存在することを利用し，河床に設置した 1 台の ADCP によって感潮域の流量を推定しているものもある[6)]．

流速の測定には，ADCP に加え，電波流速計や PIV などで水面流速を測定するもの[7)]，超音波流速計や H-ADCP で特定の水深の横断平均流速や横断流速分布を測定するものがある[4,8)]．このうち，H-ADCP は濁りによる音波の減衰や密度分布による音波の屈折，河床や水面に超音波ビームが反射することによる測定限界が指摘されている[9)]．上下流への音波の伝播時間差から横断平均流速を求める超音波流速計は，歴史も古く，広幅河川の流量を連続測定できる有力な方法であるが，高精度な時計や高度な信号処理技術が要求され，改良の余地が残されている[10)]．

著者らは世界で初めて塩水遡上のある河口・感潮域においても流量の自動計測を実現した，河川音響トモグラフィー (FAT) システムの開発に成功した[11−13)]．本論文では，その概要と，FAT システムを感潮河川である太田川放水路（広島市）と礫床河川である江

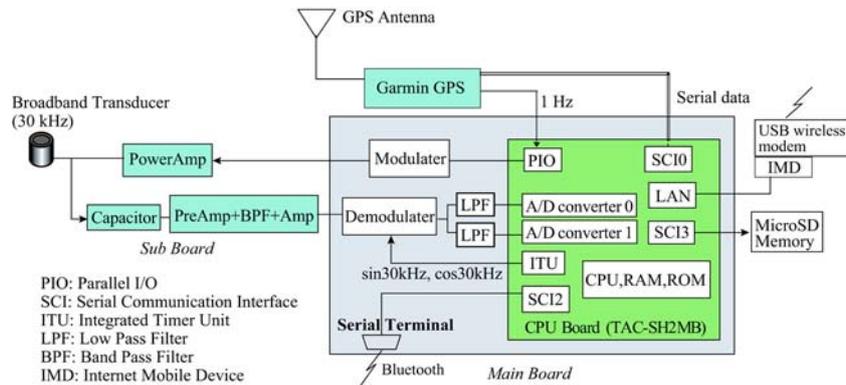



図-1 河川音響トモグラフィーシステムの構成図

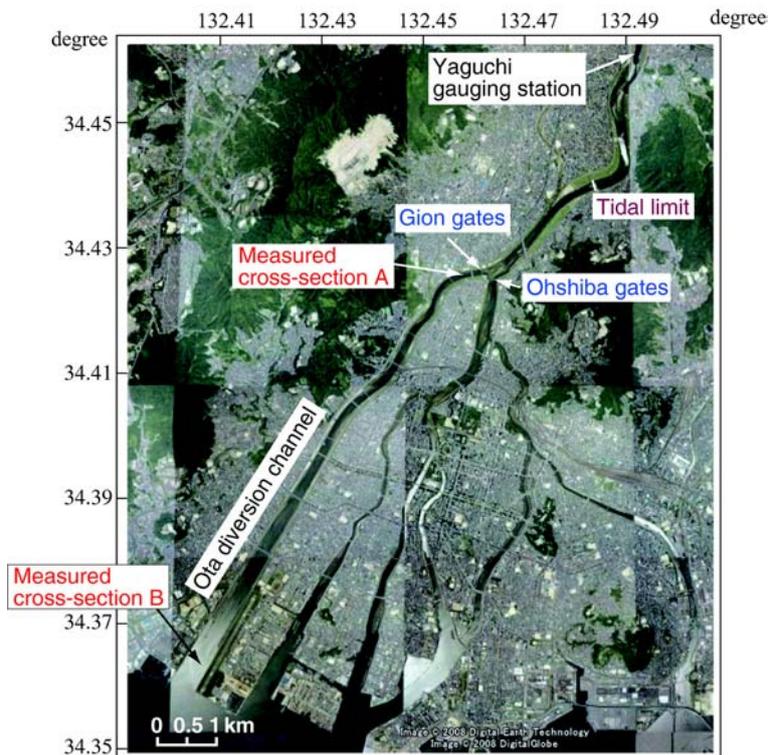



図-2 太田川放水路の観測断面位置

の川（三次市）に適用した結果を報告する．

2．河川音響トモグラフィー (FAT) システムの概要

基本的な測定原理は時間差方式の超音波流速計と同様である．ただし，FAT システムは河川横断面を覆う音線を利用するため，特別な場合を除き，流速分布を考慮する必要がない．また，符号化された擬似ランダム信号（M 系列）で位相変調しているため水中ノイズに強く，受信波を確実に検出できる．さらに，低流速でも測定が可能なように，GPS の正確な時間情報を用いている．

著者らが新たに開発し河川音響トモグラフィーシステムの構成図を**図-1** に示す．2 台 1 組で構成される本流量測定システムは，GPS の原子時計を利用して，同時に送受波器（トランスデューサー）から双方向へ超音波を発射する．超音波パルスの送出が完了後速やかに，トランスデューサーは送信回路から受信回路に切り替えられる．一般に，従来のように単純に規則波を送っても，水中雑音の中から送信波の受信時刻を正確に判定することは困難である．そこで，本システムの送信波は 10 次の M 系列で位相変調されており，受信波の高い SN 比が確保されている．この位相変調技術と GPS の正確な時間情報の利用によって，高精度な受信時間の測定が可能となっている．

位相変調波を発信するためにはブロードバンド型トランスデューサーが必要である．開発した2組のシステムでは，それぞれ，米国 ITC 社製の小型トラン

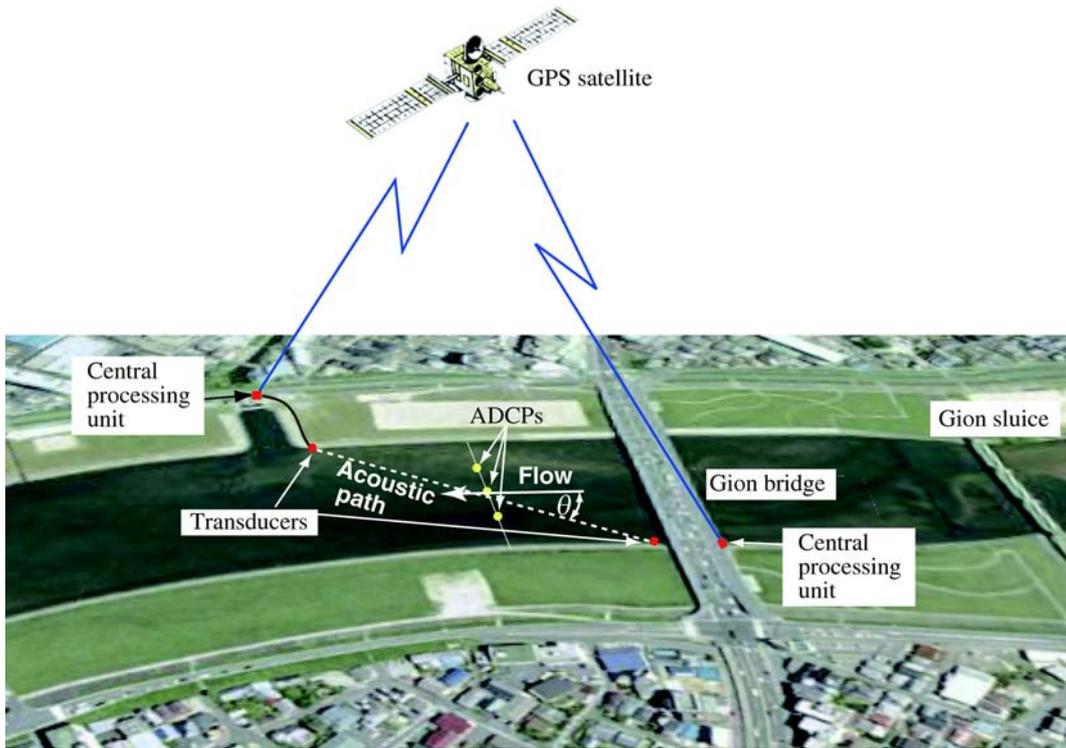



図-3 太田川放水路祇園地点における測定概要

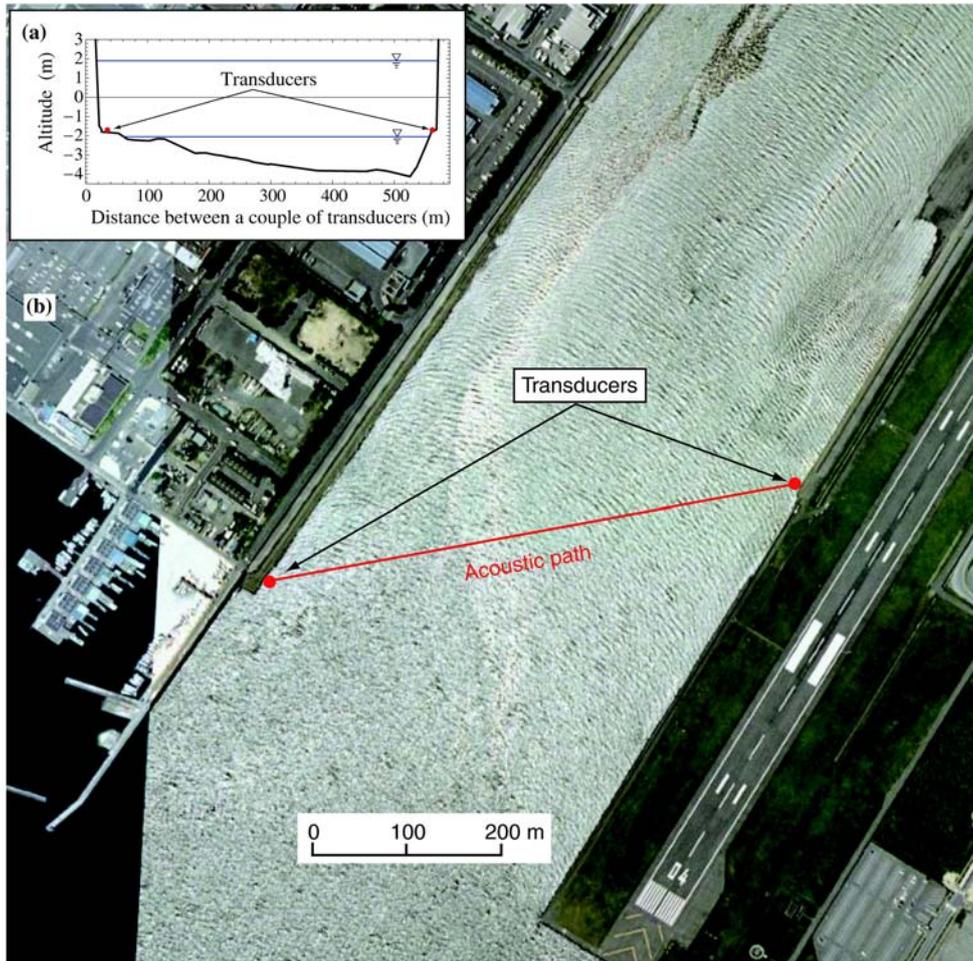



図-4 太田川放水路河口部における測定概要

図-5 江の川における観測断面位置（トランスデューサーの設置位置）

スデューサー（ITC3422；中心周波数 30 kHz）と英国ネプチューン社製の小型トランスデューサー（T227；中心周波数 25 kHz）が使用されている．開発したシステムは設定ファイルにより駆動周波数の変更が可能なように設計されている．中心周波数 ±20％ の範囲であれば，送信音圧レベルと受信感度の大きな低下はない．T227 の中心周波数は 25 kHz であるが，30 kHz で使用しても音波の到達距離は 2 km 超であることを確認しており，本研究では，流速の分解能を上げるため，中心周波数を 30 kHz にして使用している．トランスデューサーの指向性は弱く，超音波はほぼ全方向に発射される．

２．測定方法

(1) 太田川放水路観測

図-2 に示すように，太田川は河口から約 9 km 上流で放水路と市内派川に分派しており，放水路側に祇園水門，市内派川側に大芝水門が設置され，放水路と市内派川へ流入する流量配分が調整されている．平常時は大芝水門は全開，祇園水門は 3 門の内，右岸側のスルースゲートのみが 0.3 m だけ開けられており，放水路と市内派川の流量比は 1:9 とされている．しかしながら，太田川の分派点は感潮域にあるため，流量比はたえず変動しており，既存の技術では正確な分派流量を把握することは困難である．そこで，太田川放水路への流入量の常時観測を目的に，次世代超音波流速計を祇園水門の下流に設置し，流量の連続測定を実施中である．水路幅は約 120m で河床材料は砂である．大潮期における測定地点の潮差は 3 m 弱ある．測定の概要を**図-3** に示す．一対のトランスデューサー（超音波の送受波器）を低水路護岸法尻に，処理装置本体は祇園大橋と右岸の安川樋門制御室に設置し，商用電源で作動させている．使用したトランスデューサーは ITC3422 である．

放水路上流端にある祇園水門下流部に加えて，**図-4** に示すように，放水路河口部に FAT システムを設置し，河口流量を無人で計測した．使用したトランスデューサーは T227 で，電源はソーラーシステムを使用した．

(2) 江の川観測

FAT システムのトランスデューサーから発射された超音波は，水面と河床面をウェーブガイドとして，河川横断面を導波管として伝播する．したがって，河床材料が粗い場合，河床面で超音波が乱反射し，超音波の伝搬損失が大きくなる可能性がある．そこで，砂礫河床河川である広島県三次市の江の川において，FAT システムの現地実験を行った．

図-5 に観測断面位置（トランスデューサーの設置位置）を示す．なお，観測断面の 346m 上流にある尾関山水位観測所において，H-Q 式により流量が評価されている．観測断面における河床の平均粒径は約 40 mm，川幅は約 115 m，平均水深は約 0.8 m である．使用したトランスデューサーは T227 で，電源はリチウムポリマー電池パック（Hyperion G3, 4000mAh, 14.8V）を使用した．

３．結果と考察

(1) 太田川放水路観測

太田川放水路に設置した FAT システムは，2008 年 6 月から 2010 年 7 月現在まで継続して流量を無人で計測している．2008 年は降水量が少なく，祇園水門

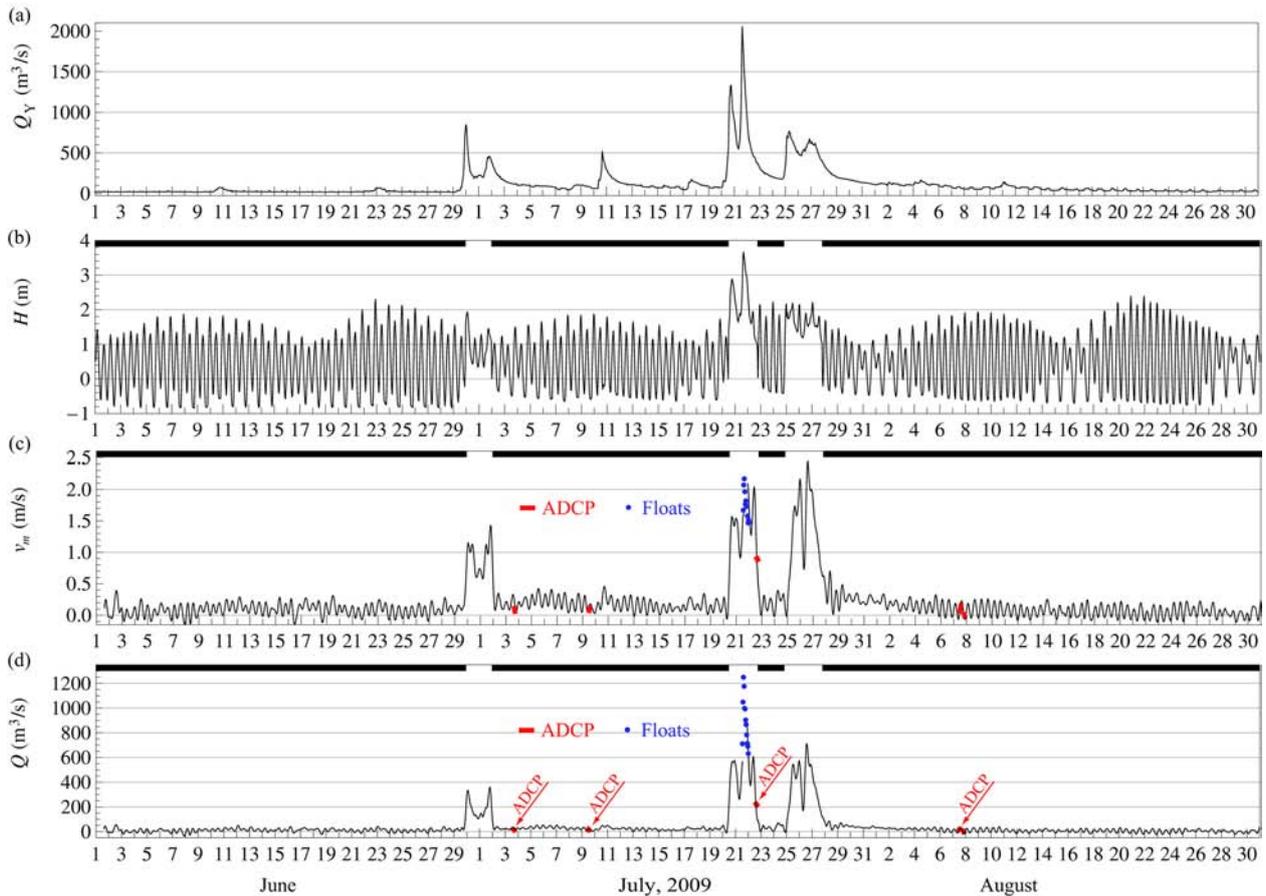



図-6 矢口流量 (a)，祇園水位 (b)，断面平均流速 (c)，流量 (d) の経日変化；赤線は ADCP，青点は浮子観測の結果

が全開となるような出水は発生しなかったが，2009 年の 6 月末から 7 月末にかけて梅雨前線の活動が活発になり，洪水が発生した．

図-6 に，洪水データを含む 2009 年 6 月 1 日から 8 月 31 日までの測定結果を，H-Q 式から求めた矢口第一流量と祇園のテレメータ水位とともに示す．また，FAT システムの測定流量と ADCP，浮子観測流量の関係を**図-7** に示す．**図-6(b)-(d)** の上部に示してある黒横バーは祇園水門が平常状態（3門の内右岸側の水門のみ開度 30 cm，他の 2 門は完閉）にあったことを，白抜きの部分は祇園水門が全開であったことを表している．したがって，図-6 の測定結果は，祇園水門が全開となった 3 回の出水データを含んでいる．**図-6(c)** と **(d)** に示す断面平均流速と流量の経日変化には ADCP と浮子観測の結果も示してある．

FAT システムの連続測定結果は，低･平水時，洪水時とも赤で示した ADCP の測定値や青点の浮子観測データと良く一致しており，本システムの測定値は妥当なものであると判断でき，FAT システムが低水から洪水まで，断面平均流速・流量の自動連続測定に成功していることがわかる．残念ながら，7 月 21 日の一部は欠測となったが，これはトランスデューサーが，洪水で運ばれてきた大量の砂で埋まってしまったことが原因だと考えられる[13]．

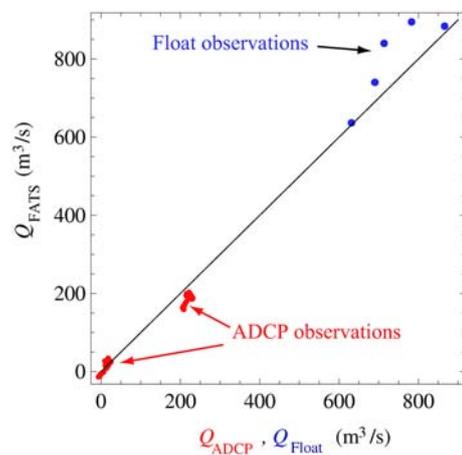



図-7 FAT システムの測定流量と ADCP，浮子観測流量の関係

2009 年 2 月 7 日～12 日にかけて行った河口部での観測結果を**図-8** に示す．**図-8(b)** に示す河口流量振幅は祇園流量振幅の約 10 倍であり，これは水位変動から見積もった放水路内の貯留量を考えると妥当な大きさである．Medwin 式[14] を使って，水温と平均音速から推定した断面平均塩分が**図-8(c)**，淡水流量が**図-8(d)** である．このように，FAT システムを用いれば，沿岸域の流動場や水環境を論じる際に必須と

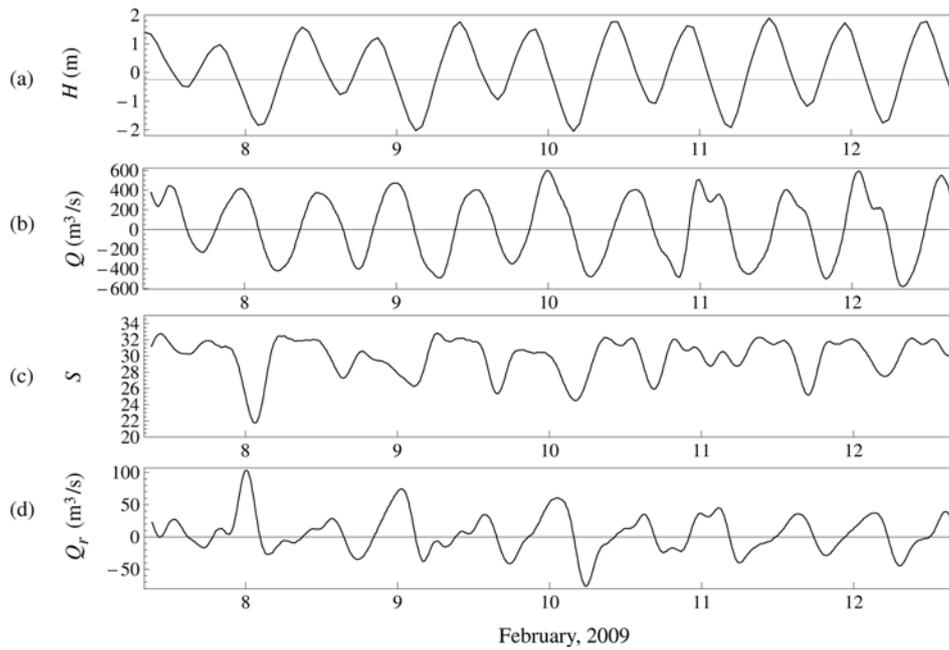



図-8 河口水位 (a)，河口流量 (b)，断面平均塩分 (c)，淡水流量 (d) の経日変化

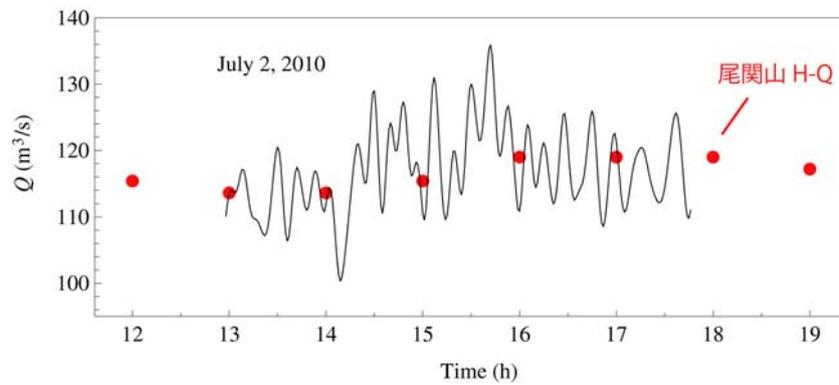



図-9 江の川流量の経時変化

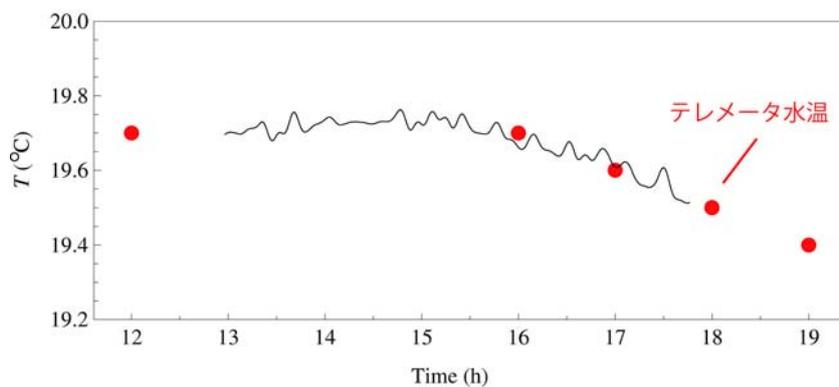



図-10 江の川の断面平均水温の経時変化

なる淡水流量を推定できる．

(2) 江の川観測

図-5 に示したように，三次市尾関山水位観測所の下流において，2010 年 7 月 2 日の 13:00-18:00 に実施した江の川観測の結果について述べる．**図-9** に FAT システムによる流量の経時変化を，尾関山の H-Q 式から求めた流量データとともに示す．両者は良く一致しており，FAT システムの動作は良好で，砂礫河床においても流量計測に問題がないことが実証された．また，心配した超音波の減衰もほとんど見られず，高い SN 比を保持していた．

FATシステムによる流量の連続データには10分程度の周期変動がみられるが，こうした短周期の流量変動は，高い時間分解能を持つ流量の連続計測が可能になって初めて捕らえられるものであり，大変興味深い．観測期間中の流量変動の標準偏差は平均流量の5％強である．

図-10は，Medwin式[14]を使って，FATシステムで測定された平均音速から推定した断面平均水温の経時変化である．観測期間内の水温の変動幅はわずか0.25℃であるが，FATシステムにより計測された水温は，図中に赤丸で示したテレメータ水温（13時から15時は欠測）と良く一致しており，微少な水温変動をとらえていることがわかる．このように，淡水域であれば，FATシステムは流量計測と同時に非常に高精度な水温計測を可能にするものである．

4．結論

符号化された疑似ランダム信号（M系列）の送受信とGPSクロック信号を利用して音波伝搬時間の高精度計測を実現した，河川音響トモグラフィー(FAT)システムを用いて，これまで実現できなかった塩水遡上のある感潮河川の流量の自動連続計測に成功した．FATシステムは流量と同時に断面平均塩分を測定できることから，河口域の淡水流量を推定できる．このことは，数値モデルによる沿岸域における水環境の予測精度を格段に向上させることを意味する．

FATシステムは上流域の礫床河川でも全く問題なく機能し，流量と同時に断面平均水温を高精度に測定可能である．

以上のように，新たに開発した河川音響トモグラフィー(FAT)は，感潮域を含む様々な河川における流量の自動計測を可能にする強力な流量観測法になることが期待される．音響局の数を増やし，インバース解析を行えば，複断面内や蛇行部の流速分布も推定できると考えられ，FAT計測の発展性は非常に大きい．なお，開発したFATシステムは，水環境モニタリング有限責任事業組合によって実用化されている．

謝辞：本研究の一部は 国土交通省建設技術研究開発助成制度 (課題番号 第31号，研究代表者：川西 澄) および (財) 河川環境管理財団 河川整備基金 (研究代表者：川西 澄) の補助を受けて実施したものである．ここに記して，深甚なる謝意を表します．

参考文献

1) 岡田将治, 橘田隆史, 森本精朗，増田稔: ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測, 水工学論文集, Vol. 52, pp. 919-924, 2008.
2) 岡田将治, 森彰彦, 海野修司, 昆敏之，山田正: 鶴見川感潮域における H-ADCP を用いた流量観測, 河川技術論文集, Vol. 11, pp. 243-248, 2005.
3) 中川一, 小野正人, 小田将広，西島真也: 横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発と大河川での実地検証, 水工学論文集, Vol. 50, pp. 709-714, 2006.
4) 二瓶泰雄，木水啓: H-ADCP観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築, 土木学会論文集 B, Vol. 63(4), pp. 295-310, 2007.
5) Chiu, C. L., Hsu, S. M. and Tung, N. C.: Efficient methods of discharge measurements in rivers and streams based on the probability concept, *Hydrological Processes*, Vol. 19, pp. 3935-3946, 2005.
6) 横尾啓介, 吉田静男, 岡田幸七, 野村佐和美: 感潮域における ADCP を用いた河川流量の推定, 水工学論文集, Vol. 52, pp. 931-936, 2008.
7) 大手方如, 深見和彦, 古谷純一, 東 高徳, 田村正秀, 和田信昭, 淀川巳之助, 中島洋一, 小松 朗, 小林範之, 佐藤健次: 非接触型流速計測法の開発, 土木技術資料, Vol. 45(2), pp. 36-44, 2003.
8) Sloat, J. V. and Gain, W. S.: Application of acoustic velocity meters for gaging discharge of three low-velocity tidal streams in the St. John River Basin, Northeast Florida, *U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report*, Vol. 95-4230, 26 pp., 1995.
9) 原田靖生, 二瓶泰雄, 北山秀飛，高崎忠勝: H-ADCP計測と数値計算に基づく感潮域の河川流量モニタリング～隅田川を例として～, 水工学論文集, Vol. 52, pp. 943-948, 2008.
10) （株）水文環境: 超音波流速計の洪水観測への応用, 河川整備基金助成事業報告書, 62 pp., 2001.
11) 川西 澄, RAZAZ, M., 金子 新, 阿部 徹: 音響トモグラフィー法による河口域における淡水流量の測定, 海岸工学論文集, Vol. 55, pp. 1466-1470，2008.
12) Kawanisi, K., Razaz, M., Kaneko, A. and Watanabe, S.: Long-term measurement of stream flow and salinity in a tidal river by the use of the fluvial acoustic tomography system. Journal of Hydrology, 380(1-2), pp. 74-81, 2010. [doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.10.024]
13) 川西澄, Razaz, M., 渡辺聡, 金子新, 阿部徹：河川音響トモグラフィーによる太田川放水路の洪水流量と断面平均塩分の連続測定. 水工学論文集, Vol. 54，pp. 1081-1086，2010.
14) Medwin, H.: Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 58, p. 1318, 1975.

（2010.7.20 受付）

H～Vs（地点表面流速）関係の変化から水理現象を読みとる

ANALYSES BETWEEN H~Vs (SURFACE VELOCITY) RELATION CHANGE AND FLOW CONDITION CHANGE IN THE RIVER CROSS SECTION.

山口　高志[1]・中島　洋一[2]
Takayuki YAMAGUCHI, Yoichi NAKAJIMA

[1]正会員　工博　(株)環境モニタリング研究所（〒170-0005 東京都豊島区南大塚3-10-10）
[2] (株)横河電子機器（〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷5-23-13）

Since the first flood discharge observatory station using Radio current meters was installed in one of the river in Japan in 1990, 20years has passed, comparison between flood discharges by floats and Radio current meters have long been done. In parallel with the works, analyses between change of H (water level) ~Vs (point surface velocity by Radio current meter) relation and change of flow condition (e.g. bed level change and /or bed roughness change) during flood, have been studied.

Several examples analysed are introduced for the cases of bed roughness decrease, bed level degradation, and dune movement down stream in this paper.

Key Words : *Radio current meter, surface velocity (Vs), H~Vs relation*

１．はじめに

電波流速計が，はじめて魚野川（信濃川水系）の堀の内に5基設置されて，はや20年が経ち，現在までにおよそ20ヶ所に達している[1)]．水面に非接触であることによるデータ取得の確実性，および電波流速計が測定した流量が浮子による流量と相関性が高いことから，表面流速しかとれないデメリットを押えて，洪水流量観測方法として，優位に立ち[2)]，現在国交省によって，換算係数fに関する現地調査等が進められている．なお，アメリカでも遅れること15年，電波流速計が使われ始めた．加えて河床高測定の試みも行われている[3)]．

一方，電波流速計が，出水中10分毎に表面流速ではあるが，データを取得するということは，流速のハイドログラフが作れるということであり，これは画期的なことであった．これまでは，ハイドログラフを作れるのは水位のみで，流速は浮子観測で最大でも15点程度（とりわけ人力によるため，出水初期はデータが少ない）であったものが，たち上がりから低減部まで連続的に取得できるようになったことになる．例えば，水位（H）と表面流速（Vs）の関係（以後H-Vs関係と略称）を作ってみれば，出水の上りと下りでほんとうに反時計回りのループを示すのか，次の出水で同じ経路をたどるのかなど，興味はつきないことになる．加えて，電波流速計は一断面に数台設置されるわけであるから，個々の地点でのいろいろな水流の変化（例えば河床や粗度の変化）にも対応して，変化することがあることも付け加えておかねばなるまい．始めての設置から20年といいながら，洪水まちの20年ではあったが，種々の特徴をもったH-Vs関係の変化例が蓄積されてきた.

以下，電波流速計による洪水流量観測のバイプロダクトとして，2. これまでの結果の紹介[4)]，3. H-Vs関係に対する水面勾配の影響の除去（利根川栗橋），4. 低水路内砂州移動に伴うH-Vs関係の変化（吉野川阿波中央橋），の順で紹介し，最後に今後の方向についても言及したい.

２．これまで読み取れた水理現象

(1) 安定河道（魚野川 堀の内 根小屋橋）

本邦初の設置ヶ所の魚野川根小屋橋（堀の内）は，北陸地整が推奨したほどの安定河道で，河床材料も径が20～30cmの礫がしきつめられたようなところで，1/300程度の急流河川であることもあって，設置4地点ともH-V関係は長い期間にわたって変化しなかった（例示略）.

笑い話になるが，筆者としては，これだけ変化しなければ，設置する必要がないのでは？と心配したことを記憶している.

⑵ H-Vs**のループ**（代表的に利根川 栗橋 利根川橋）

電波流速計が，相対に急流に強いことから，主として河川上流部に設置されてきたが，最近相対に下流の利根川栗橋にも設置され，明瞭なループの観測例も見られることとなった(**図-3.1 参照**).

通常，H-Vs図ではループは反時計回りなので，これを順ループと呼び，時計回りループを逆ループと呼ぶことにする.

⑶ **河床低下・側岸浸食**（利根川 前橋 平成大橋，利根川 八斗島 阪東大橋，吉野川 阿波中央橋，姫川 山本水管橋など）

河床低下および後述粗度低下は，通常，H-Vs関係のVs増（横軸Vsの場合，右へシフト），あるいはひと出水での顕著な河床低下は逆ループとなって現れる.

a) 利根川前橋平成大橋の場合は，1,000m3/s規模の出水が，3月，4月，5月，6月と連続し，出水毎にH-Vs関係がほぼΔVs=15cm/sずつ右へシフトした．原因を調査したところ，前年11月より直上流国道橋の増強のためのピアー新設工事で仮水路を高水敷に設けたため，土砂が流出し，その堆積物が流下したためと推測された.

b) 利根川八斗島阪東大橋の場合は、低水路最右岸の地点のH-Vsに2出水つづけて逆ループが観測され，横断図上40mの河岸後退が見られた．原因は，低水路に平行でない新設ピアーの水はねと判断された(**図-2.1**).

c) 姫川山本水管橋の場合は，相隣る2地点で，順ループと逆ループが観測された．山本地点は，扇状地の要のようなところで，流れが一点に集中すると流速大，流砂量大となり，それが下流に堆積すると，流速減，流路変更という現象を起こしたものと思われる．興味深いので，流速ハイドログラフをお示ししよう(**図-2.2**).

図中のch.3(青色)とch.4(緑色)であるが，ピークを境にVsiの急変が見られる．わずかながら，ch.5とch.6との間にもその傾向は認められる.

d) 阿波中央橋の場合は，H16年左岸高水敷上で4つの出水中，前2つの出水で明確な逆ループを観測し，河床低下も観測された(**図-2.3**，横断図は後出**図-4.3**).

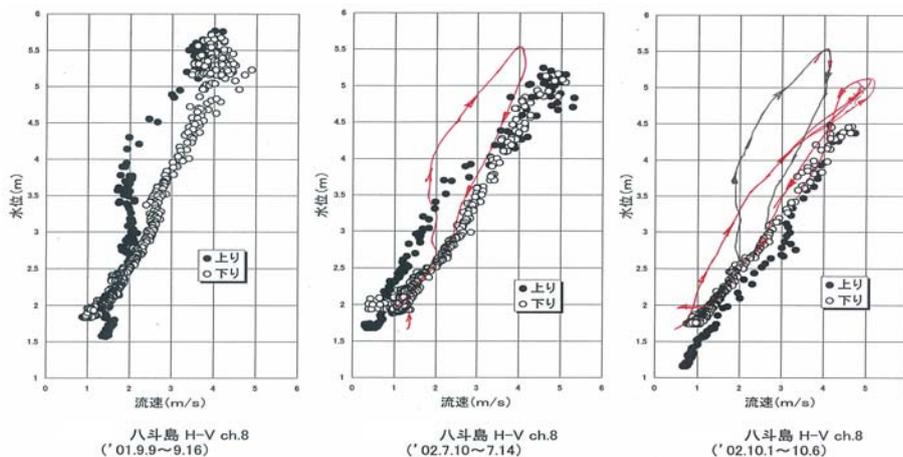



図-2.1 H～V_{S8}**八斗島**

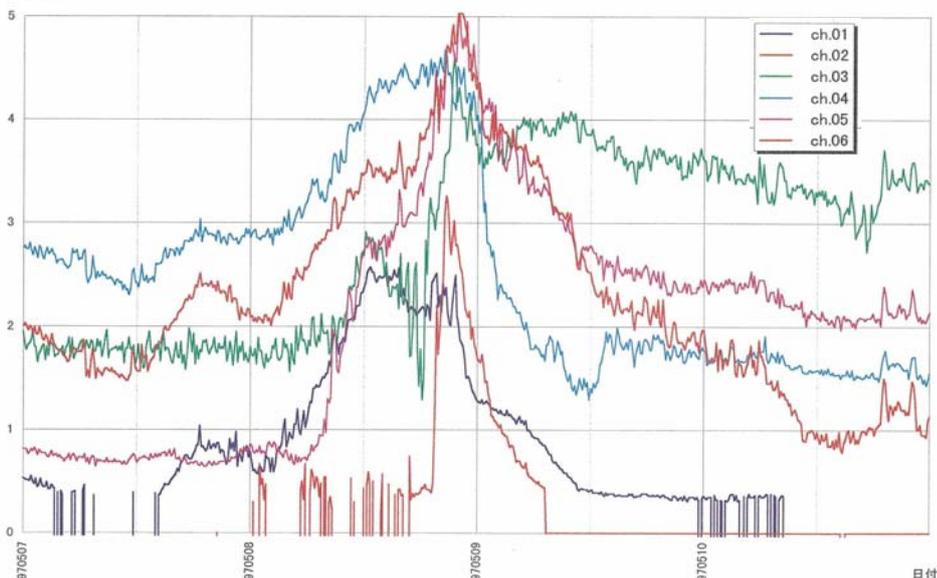



図-2.2 $V_{S1\sim6}$ **ハイドログラフ （姫川 H9.5）**

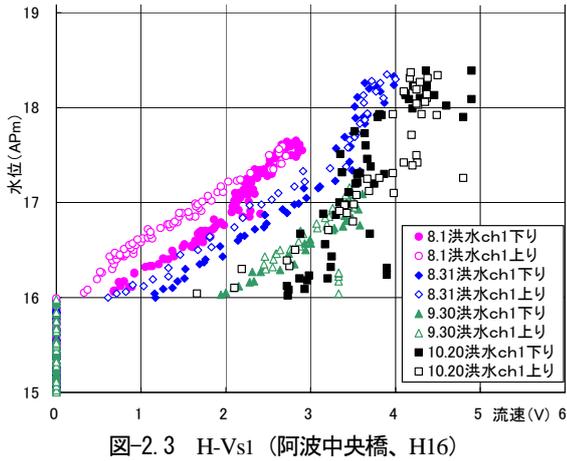



図-2. 3　H-Vs1（阿波中央橋、H16）

(4) 粗度低下（吉野川 瀬詰大橋，阿波中央橋など）

d)でも触れたが，H16年（台風の当たり年）に，4つの台風が吉野川に豪雨をもたらし，それぞれQ_{max} = 8,000, 12,000，9,000，16,000m³/sの出水となった．

同川36km瀬詰大橋の高水敷の測点ch.5では，特徴的なH-Vsカーブを示した（図-2. 4）．図中，第1および第3の出水では，上り下りほぼ同一経路をたどったのに対し，第2および第4の出水では，大きな逆ループを示した．筆者は，出水前，第2出水後，第4出水後の3時期にch.5の橋上から写真を撮っているが，潅木等が2回目に半減，3回目にはほぼ皆無という状態であった．（写真省略）

推測するにQ=10,000m³/sあたりで高さ2,3mの潅木が倒れ流失し，粗度の減少となったものと思われる．因みにH=30mでの流速は2m/sから4m/sに上昇，すなわち粗度係数nは，半減したことになる．

粗度の減少例は，下流の阿波中央橋を含め低水路でも，顕著な逆ループとしては現れないものの，出水毎にVsの漸増が見られた．河道が大出水の流れにしたがって平滑化されたものと考えられる．

(5) 8の字ループ（順ループと逆ループのはざま）

(3)，(4)と逆ループ（河床低下，粗度低下）の例を多く紹介してきた．しかし，水理的に言えば，順ループになる要因には3種あり，すなわち洪水波として本来の順ループの他に，河床上昇および粗度上昇などがあるが，姫川のように端的に現れたもの以外は，現状ではこれらの分離は不可能といえよう．まして出水中の河床高さえ観測されていない現状では．

河の中の現象であるから，当然両要因のせめぎあいも発生するわけで，その一つの例として，8の字ループが現れる．紙数の関係もあって例示は避けるが，図-2. 1中の第2出水目，後出図-4. 4などに見ることができる．図-2. 1の場合は，実は第1出水目が6,000m³/s規模が24時間続くほどのずっしり重いものだったので，浸食の大半が終了していたものと推測される．

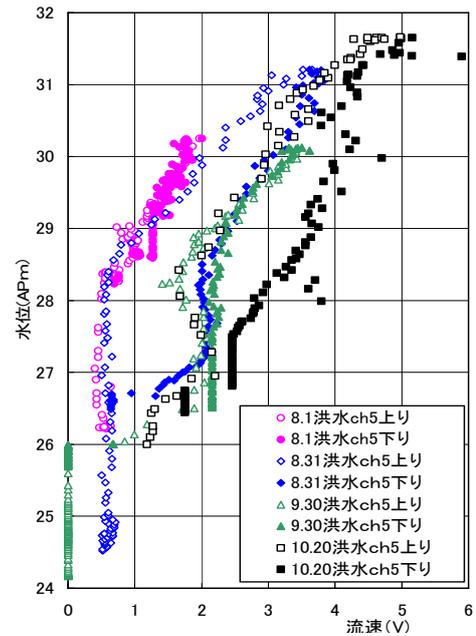



図-2. 4　H-Vs5 （瀬詰大橋 H16）

3. 水面勾配に起因するループ特性の除去の試み（利根川栗橋）

八斗島に設置されていた電波流速計10基は，H17年に栗橋に移設され観測を開始し，H18年には5,000m³/s規模の，H19年には待望の10,000m³/s規模の出水を観測することができた．

たまたま両出水のハイドログラフが相応に個性的だったことと，距離が小さい欠点があるが，栗橋の水位計と橋上の電波流速計用の水位計があったことから，水面勾配（Δx = 約200m）を求め，表面流速観測値から水面勾配に起因する変動を除去することを試みた．

たてた仮説は，表面流速と水深方向平均流速との関係として，

$$0.85Vsi = \bar{V}i \qquad (1)$$

$\bar{V}i$ ：測点iの水深方向平均流速

マニング式の拡張解釈である

$$\bar{V}i = (1/n)hi^{2/3} I^{1/2} \qquad (2)$$

(1)(2)式を変形し

$$Vsi/\sqrt{I} = (1/0.85n)hi^{2/3} \qquad (3)$$

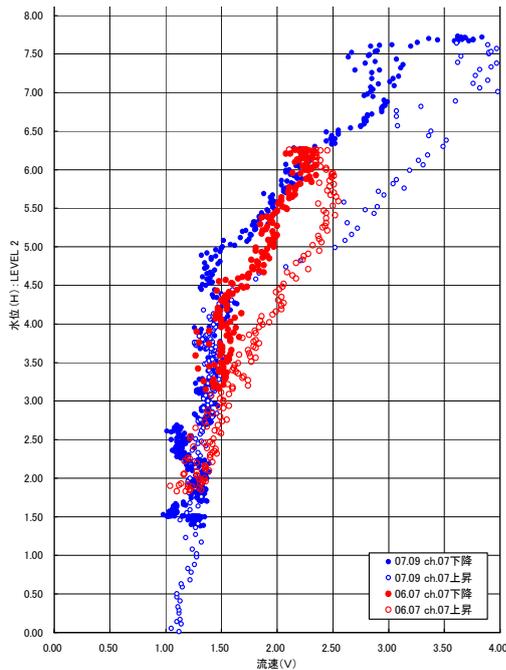



図-3.1　H～Vs7（利根川栗橋 H18,H19）

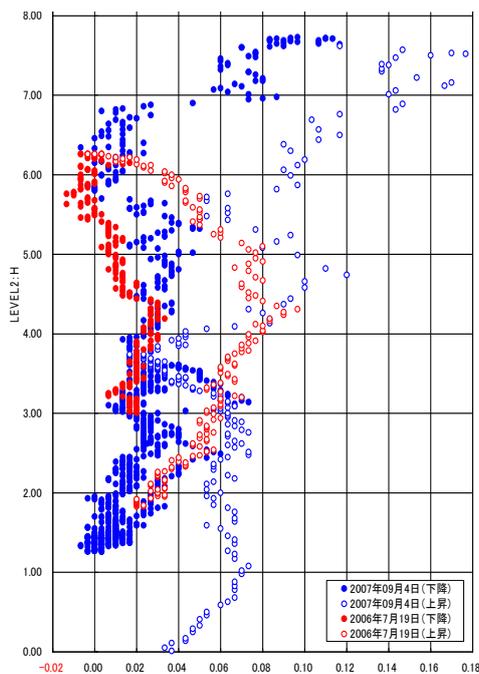



図-3.2　H～√I（利根川栗橋 H18,H19）

この関係式を利用して作成した$H(=h+z) \sim Vsi/\sqrt{I}$ 図の一例をH～Vi，H～Iともども示す(図-3.1～3)．

なお，h：水深，z：河床高である．H～I関係は，ハイドログラフの故以もあって，複雑な動きをしていたが，$Vsi/\sqrt{I}$ は，両出水とも同じような形状を示し，加えて $Vsi/\sqrt{I} = h^{2/3}/0.85n$ の形状ともほぼ一致した．

このことから，水面勾配起因の変化は，$\sqrt{I}$ で除することにより，ほぼ説明ができること、またH= 6m付近で

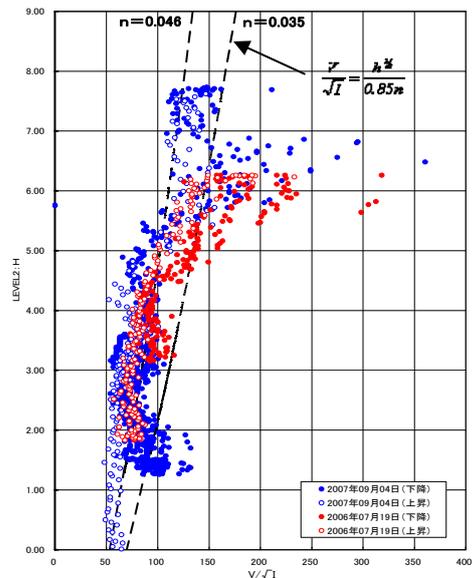



図-3.3　H～Vs7／√I（利根川栗橋 H18,H19）

の$V/\sqrt{I}$ の増加は，河床波消滅等による粗度減（n減）か，河床低下による流速増（h増，h = H-z）ではないか，ひいてはマニング式の拡張解釈も、真とは言わないまでもそれほど的外れではない，ことなどが推測された．

以上は一例にすぎず，まだ提案の域を出ないが，出水中の河床高測定等により，実証されていくことが望まれる．

4．低水路内砂州移動とH～Vsiの変化

前述のように，H16年に4つの大出水があり，同年末には，瀬詰大橋（36k）と阿波中央橋（25k）の電波流速計データの一次解析などは終わっていたのだが，翌H17年6月に，徳島河川国道事務所が空中写真撮影を実施し，それが公表され，筆者にとっても新しい情報になった．

H14年5月のそれと比較すると，全体としての砂州の移動に気づいた(図-4.1～2)．図-4.2（H17年）中には，図-4.1中の白い砂州部分をピンクのハッチで示してある．前後の砂州を比較していただくと，砂州の大きさは植生等の流失のため，相対に大きくなっているが，砂州の先端部に着目すると，いずれの砂州も200～250m流下していることに気づかされる．

1年の間に4つの大出水があったためだろうが，本地点が砂州移動の顕著な地点であることが分かる．

補足して，右岸高水敷上にも洪水流下の爪あとが白く残っている．最大の出水だった第4出水の際に発生したのであろう．

図-4.1　空中写真　阿波中央橋（H14）

図-4.2　空中写真　阿波中央橋（H17）

写真 4.1

写真 4.2

写真 4.3

写真 4.4

写真説明　：前頁2枚 左下 いずれもch4付近から、砂嘴を（H16.9.2出水後）
　　　　　：右下H15.9（奥左、本川、右 派川）

写真 4.5
写真説明　：砂嘴（H16.12，４出水後）

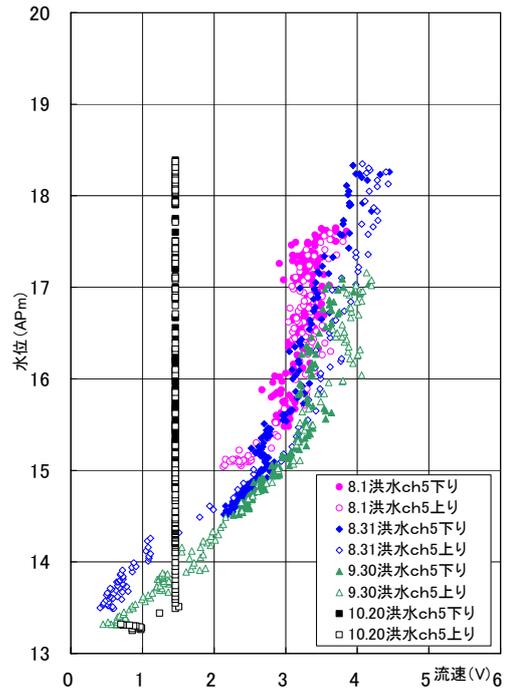
図-4.3　横断図変化（右端流下）

図-4.4.1 H-Vs4 （阿波中央橋、H16）

図-4.4.2 H-Vs5 （阿波中央橋、H16）

前述したように筆者は，前，中，後3回現地を訪れ、阿波中央橋では，左岸高水敷の河床低下，そしてその下流部に長さ100m余の砂堆の堆積（高水敷上），橋直上流の本川・派川の合流点からの砂嘴の伸長，下流ピアー後流域の砂州の流失，他に左右岸水位差の発生（右岸側大, 最大1m）などを見て来たのであるが，ここでは主として，砂嘴通過時のH-Vs4の変化にしぼって紹介しよう．

まず合流点から発達した砂嘴の写真を**写真-4.1～5**に示す．**写真-4.1～3**が，ch.4付近からとった２出水後のもの，ピアーまで到達している（正面左が本川）．**写真-4.4**が前年9月のもの，**写真-4.5**が４出水後，砂嘴はつけ根で切られている．横断図（橋上流15m）４出水前後 **図-4.3参照**.

そして，ch.4のH-Vs関係が**図-4.4.1**である．写真からほぼ4出水を通して，高さこそ減少したであろうが，砂嘴があったことがわかる．そして，砂嘴がいつ発生したかであるが，H-Vs関係から判断すると第1出水の間にピアーまで到達したことが推測される．そしてどのように解釈するか，砂嘴の伸長の始めの流速の増加，砂嘴のch.4前面通過とともに流速減，その後水位増に伴う増加，ピーク後減少とたどり，結果的に8の字ループとなった．

砂州が流速計前面を横切るというあまりない現象なので，それほど参考にならないのかもしれないが，第1出水のH-Vs関係は，ch.3にも類似して起きている（**図省略**）．参考までに，ch.4右岸側のch.5のH－Vs5 図を**図-4.4.2**（第４出水は欠測）に示す．ch.4第１出水のような変化は見られない．その後の第2出水での総体としての流速減と，砂州高が減じたのか，第3，第4出水の流速増も興味深い．少し克明に見ると，第2出水では，H=15～17mで第1出水

をたどりながらの順ループ，第3出水では逆ループ（砂州をけずる？），第4出水では，H=17m以上で順ループなどが認められる．それでもch.4は，前面に砂堆があるためなのか，両隣のch.3，ch.5と比較して，流速は相対に低かったことを付記しておく．

以上，ch.4については，解説の域に達せず，紹介にとどまっている感があるが，敢えて掲載した．想像力をたくましくしていただきたい．

H～Vsiと関係はないが、河道内砂州移動の興味ある一形態が、前出(d)に関連して左岸高水敷で生起しているので紹介しておく。

橋下流の高水第1及び第2測線の出水前、3出水後、4出水後の横断図（**図-4.5～6**）と、橋中央付近からとった**写真-4.6** 砂堆側面を示す．すなわち、橋上流部でけずられた砂礫（**図-4.3**）は、そのままそっくり直下流に順をおって堆積、両側をも埋めていることが読みとれる．通常なら河積不足になるため、大量に堆積しないであろうが、高水敷故に流積増を低水路にまかせたという結果になった。出水規模が大きかったことが一因であろうが、砂州移動が忠実に行われたともいえよう。

写真 4.6

写真説明：中央橋下流，左岸高水敷上の砂堆(橋中央から)

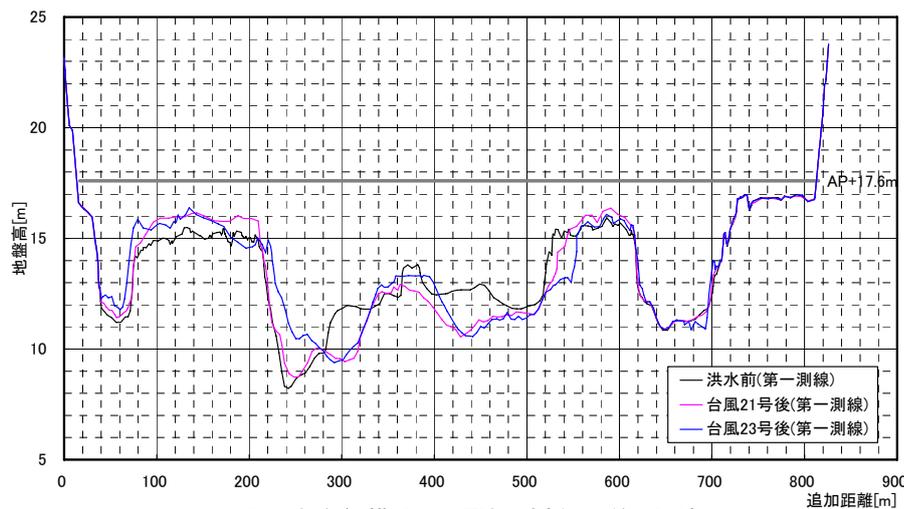



図-4.5 出水前後 横断図（阿波中央橋）：第一測線

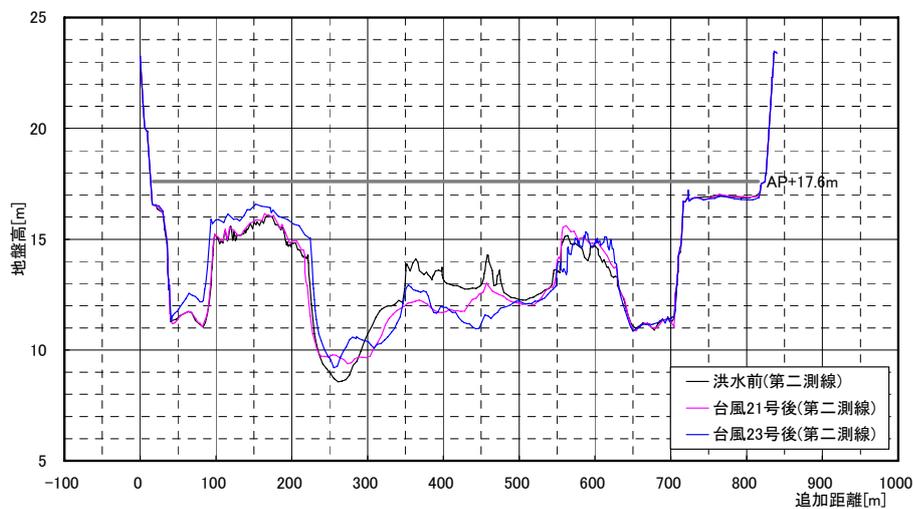



図-4.6 出水前後 横断図（阿波中央橋）：第二測線

５．これからに向けておわりに

電波流速計は，本来洪水流量を測るためのものである．しかし，冒頭にも触れたように，20年洪水まちをしながら，多くの変幻自在なH-Vsi関係に遭遇し，そのうち何割かについては，その法則性を見出すことができたものもあった（2章など）．しかし，そこでも触れたように，例えば順ループ，逆ループの要因は複数あって，その分離は容易ではない．順ループの要因の1つ水面勾配分の除去は3章で試みたが，まだ十分と言えるものではない．例えば，河床高計があって，出水中河床低下あるいは河床波発生の有無等の情報があれば，もう少し結論めいたことが言えるのではないだろうか.

第4章では，空中写真の情報から砂州の大幅移動を認知し，砂州上H-Vsiの変化を紹介したが，ほとんど紹介にとどまった．この点について，ここでお詫びしておきたい.

20年の長い間には，H-Vsi関係の変化から，河床高が推定できるのでは（?）と妄想に夢躍らせたこともあったが，やはりこれに解を与えるためには，今一段の現地観測体制の強化が必要であろう.

具体的には，水位計の増設（水面勾配取得のための水位計1～2点，横断方向水位差の有無（とりわけ高水敷の考慮）のための水位計1～2点など）に加えて，河床高計の設置（低水路2～3点，高水敷1点）が，例えば電波流速計設置地点などでは望まれることである.

現在，国総研では，吉野川，富士川の2ヶ所（それぞれ3測点）で鳥居型H鋼など＋超音波測深器による河床高測定を試みておられる.

謝辞：電波流速計のデータ，また横断図，浮子流量データの取得にあたっては，多くの国交省河川事務所職員，またメーカー社員の方々から便宜供与をいただいた．なお本稿作成には、河口尚子氏（東京建設コンサルタント）、岩本理恵氏（環境モニタリング研究所）の手を労した．あわせて感謝の意を表したい.

また，本稿作成のチャンスを与えていただいた河川流量観測高度化研究会の皆様にもお礼申し上げる.

参考文献

1) 山口高志，新里邦生 他：電波流速計による洪水流量観測，土木学会論文集，No.497, II-28，1994.
2) 土木研究所水文チーム：流量調査手法に関する検討業務，2008.3
3) Costa J. F. et al： Use of radars to monitor stream discharge by non contact methods, WWR Vol. 42，2006.
4) 山口高志：表面流速の変化が読んだ河道水理，水水学会2005年研究発表会，2005.8

（2010. 7. 20受付）

都市二級河川における洪水流量観測と河川計画上の課題

FLOOD DISCHARGE OBSERVATION USING ROD FLOAT AND RIVER PLANNING ISSUES IN CLASS B URBAN RIVER

宮本守[1]・宮本強平[2]・岩井茂雄[3]
Mamoru MIYAMOTO, Kyohei MIYAMOTO and Shigeo IWAI

[1]正会員　博士(工学)　独立行政法人土木研究所　水災害・リスクマネジメント国際センター
（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
[2]学生員　日本大学大学院理工学研究科　社会交通工学専攻
（〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1）
[3]正会員　博士(工学)　日本大学理工学部教授　社会交通工学科
（〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1）

Most rivers located in urban areas are small- and medium sized rivers. In recent years, flood disasters and accidents in such rivers are increasing. To cope with those issues, river administrators have addressed flood control measures such as river improvement, construction of retarding basins and continuous observation of hydrological index. However, it is still nearly impossible to accurately estimate flood discharge and stage-discharge relation in small- and medium- sized rivers. Because of that, it is difficult to carry out river planning based on past flood discharge records.

In this study, high water discharge observation was carried out in the rapidly urbanized Ebi River. The study also examined the accuracy of observation in details under different conditions and discussed river planning issues in small- and medium-sized urban rivers.

Key Words : *Flood discharge observation, H-Q curve, rod float, compound cross section, class B river, urban river, river planning*

１．はじめに

都市域および周辺地域を流れる河川のほとんどは二級河川もしくはさらに小規模な河川であり，近年ではこのような小規模河川における水害，事故が増加している．河川を管理する自治体等は，治水対策として河川改修や遊水地の建設，そして雨量や水位の継続的な水文観測を行っている．しかしながら，二級河川を含む多くの小規模河川では，洪水時の流量データや水位流量関係が不明であり，洪水流量実績に基づいた河川計画が困難になっているのが実情である．

本研究では，近年において急激に都市化が進んだ千葉県船橋市の二級河川海老川を対象に浮子を用いた洪水流量観測を行い，水位流量関係式の作成を行った．その際に，観測時の浮子の使用等に関する測定精度や複断面における水位流量関係の算出について検証した上で，観測実施条件が測定結果に及ぼす影響について考察した．さらに，実際に河川計画上用いられている既存の水文観測データと著者らが行った出水時観測のデータを比較し，各流量データから算出された水位流量関係や流出特性を比較検証した．以上の結果から，二級河川のような洪水流量データが不十分な小規模河川における河川計画・管理上の現状の問題点と留意すべき点，今後の課題について考察した．

２．海老川流域の概観

(1) 海老川流域の緒元

海老川流域は流域面積27.1km2，流域人口約21万人の小規模の都市流域である．河口である船橋港から約2.2km上流までが二級河川の海老川，さらにその上流が念田川である．海老川には，長津川，北谷津川，高根川，宮前川，飯山満川，前原川・中野木川の7支川が合流している．図-1は2003年時の海老川流域の土地利用である．

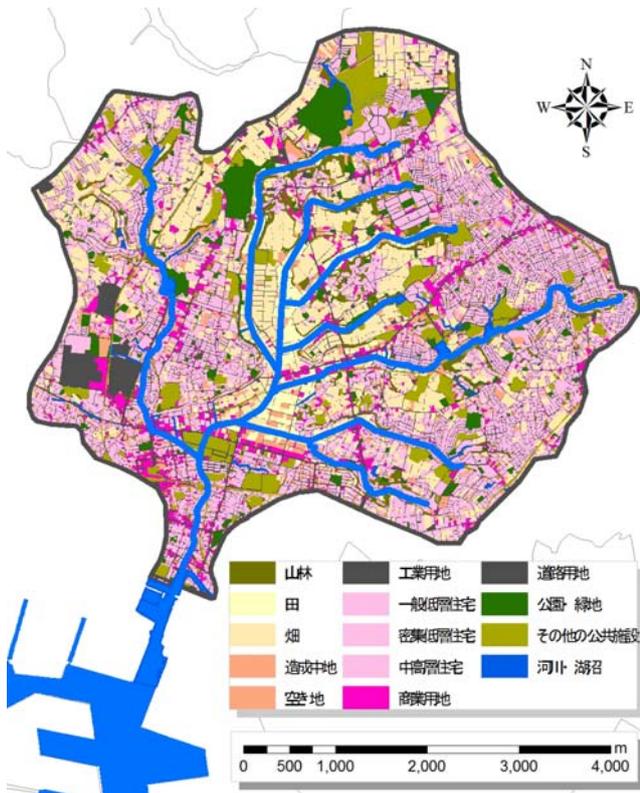



図-1　海老川流域の土地利用図

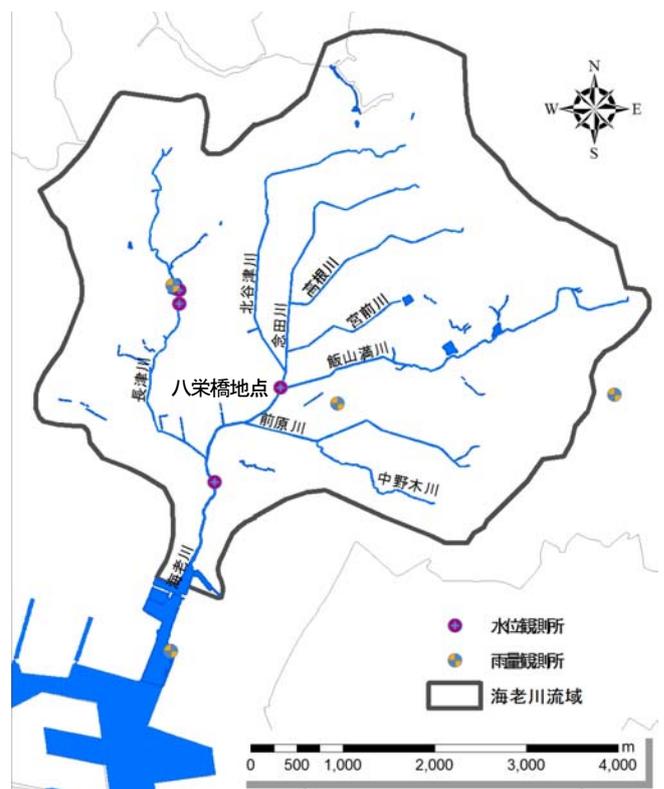



図-2　海老川流域内の水文観測施設

流域の土地利用形態は，流域中心部と北部に残存する一部の田畑を除くほとんどの地域を市街地が占めている．昭和20年代には市街化率15%程度であったが，昭和30年代以降の急激な開発により現在の市街化率は約70%以上になっている．

(2) 海老川流域における継続的な水文観測

海老川流域では，4つの水位観測所（船橋本町，八栄橋，長津川外，長津川内）と２つの雨量観測所（船橋東，長津川調節池）が設置されており，1996年から継続的な水文観測が行われている．**図-2**は流域内の各支川と水文観測施設である．なお，流域外ではあるがAMeDASの船橋地点が流域近くに設置されており，流域を雨量観測所でThiessen分割した際にはこの観測所も流域内に面積を有する．

(3) 海老川流域が抱える河川管理上の問題

昭和30年代以降の急激な市街化を受けて，海老川流域では洪水氾濫，低水流量の減少，水質悪化，水利用形態の変化，生態系の変化等の多様な問題が発生している[1]．特に洪水氾濫に関しては，海老川流域ではおおよそ2年に1回程度の頻度で浸水被害が発生しており，上流部や支川では20mm/hour程度の降雨でも浸水被害が発生した事例もある．

(4) 水循環再生のための施策

海老川流域の水循環再生を目指す，海老川流域水循環

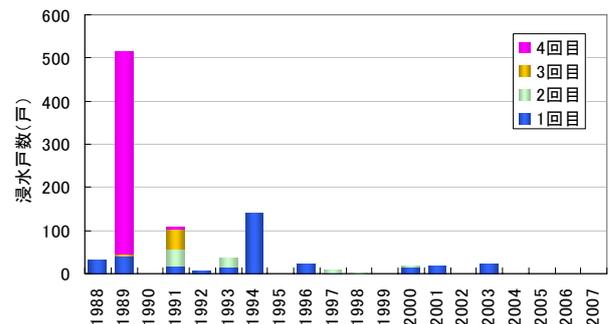



図-3　海老川流域における年別浸水戸数

再生推進協議会では，水循環再生を目指してこれまでに河道改修，下水道の建設，雨水浸透施設の設置，環境用水量の確保，多自然型川づくり，公園・緑地の整備と保全等の主として治水に関する施策を行ってきた[2]．治水に関する施策はこれまでに概ね実行されてきたため，現在では特に「清らかで豊かな流れの創出」を目指し，水質の浄化，低水流量の確保，湧水の保全と再生に対する取り組みがなされている[3]．低水流量の確保のためには，高校等の公的用地における雨水浸透施設の設置や調節池による環境用水の確保に加え下水処理水の利用を試みており，湧水の保全・再生に関しては，新規住宅に対する雨水処理施設の設置促進を行っている．水質浄化のためには，下水道の整備を推進することに合わせ合併処理浄化槽の普及，流域外である印旛沼流域下水道からの下水処理水の導水を行っている．

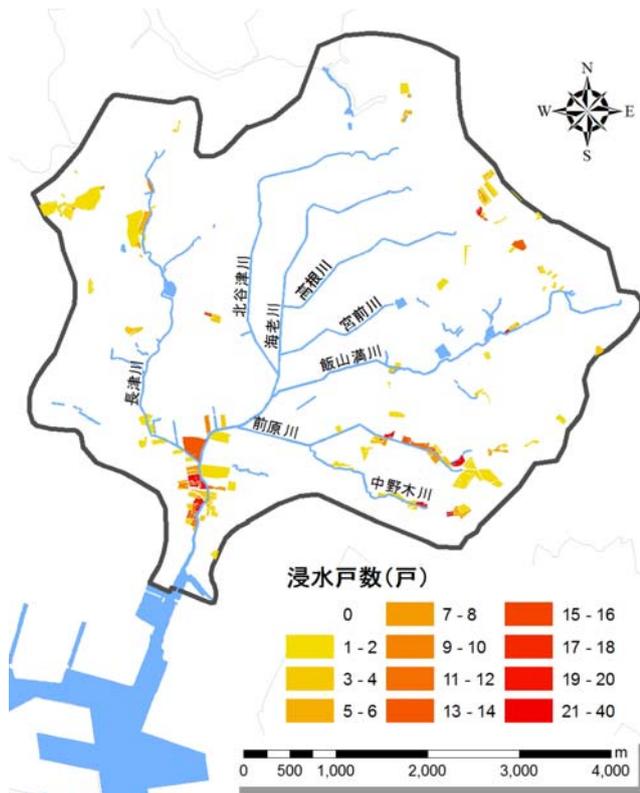



図-4　海老川流域の総浸水箇所

（1988年から2007年までの20年間に発生した23洪水）

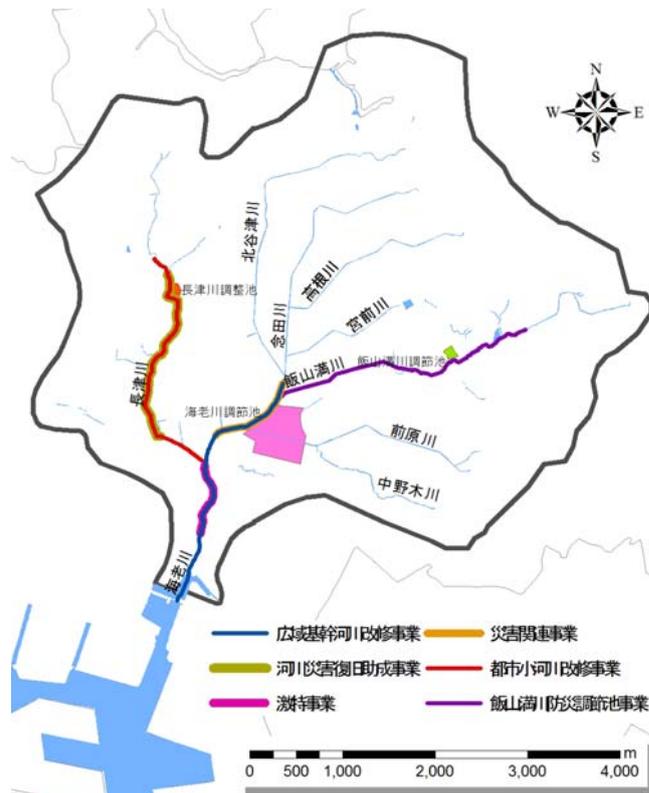



図-5　海老川流域内で実施された治水事業

(5) 海老川流域における水害実績

資料が存在する1988年から2007年までの20年間を対象に，船橋市の水害実績から海老川流域における浸水戸数を整理した．船橋市の水害実績としては，1966年からの記録が残っているが，浸水区域の詳細な番地が不明であるため，本研究では上記の期間とした．対象期間中の海老川流域内における水害は過去20年間で23回発生している．**図-3**は過去20年間の浸水戸数を洪水別に示している．最近10年間での浸水事例は小規模な浸水のみであり，1回の洪水に対する浸水被害の規模は縮小傾向にある．**図-4**は1988年から2007年までの20年間に発生した23洪水の総浸水戸数の空間分布である．浸水戸数の多いエリアは河川に隣接したエリアであることから，外水氾濫による浸水被害であると考えられる．一方，上流部では内水氾濫によって河川から離れたエリアにおいて浸水が発生しているおり，近年においてもこのような小規模な浸水は発生している．

(6) 海老川流域の治水対策

海老川流域ではこれまで数多くの水害に見舞われ，甚大な被害を被ってきた．そのため洪水被害を軽減すべく多く治水事業が取り組まれている．**図-5**は海老川における河道改修および調節池設置箇所であり，**表-1**は治水事業の緒元である．海老川下流部および長津川下流部では1980年前後に河道改修が開始され，河道改修後に大規模な氾濫が発生していないことがわかる．

表-1　海老川流域における治水事業の緒元

河川	事業名	規模	整備期間	区分
海老川	広域基幹河川改修事業	2670 m	1976～	河道
		22 ha	1979～	調節池
	激特事業	830 m	1986～1990	河道
	災害関連事業	907 m	1996～1997	河道
長津川	都市小河川改修事業	2935 m	1983～1993	河道
	河川災害復旧助成事業	2274 m	1984～1988	河道
飯山満川	防災調節池事業	2780 m	2006～	河道
		1.447 ha		調節池

(7) 海老川流域を対象とした既往の研究

海老川流域を対象とした既往研究としては，Jiaら[4]による数値解析が挙げられる．Jiaらは分布物理型の水・熱循環解析モデルであるWEP (Water and Energy transfer Process)モデルを開発し，雨水浸透施設を導入した場合の流域対策の効果を検証した．さらに防災調節池の洪水流出抑制効果を検討した上で，防災調節池の有無と浸透施設の有無の組み合わせた4ケースで，洪水流出抑制の効果を比較している．

3．洪水流量の集中観測

海老川流域ではこれまでに，浸水被害に対する治水対策を施してきており，実際に河川改修等により被害は縮小傾向にある．しかしながら，浸水被害の可能性は今後も有しており，異常気象に起因する超過洪水等への対応も考えなければならない．したがって洪水観測に基づく

写真-1　平水時の海老川八栄橋地点

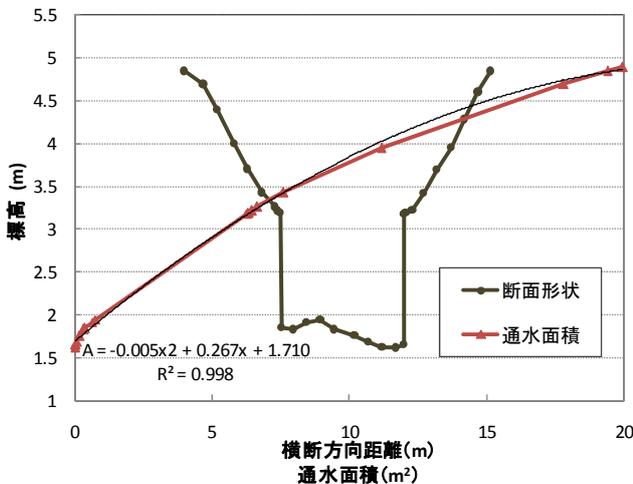



図-6　海老川八栄橋地点の断面形状と通水面積

写真-2　流速測定に用いた浮子

写真-3　観測風景

河川計画・管理が求められ，そのためには出水時に現地観測を行い，洪水の詳細な流況を解明することが不可欠である．

(1)　洪水時流量観測の実施概要

洪水流量観測は，海老川の河口から2.2km上流の八栄橋地点において2009年10月8日3時20分から10時50分までの7時間30分実施された．八栄橋地点の横断面形状は，**写真-1**に示したように低水路が直立コンクリート護岸になっており，その上部が斜面になっている複断面形状である．八栄橋地点の断面形と通水面積を**図-6**に示す．
流速測定には浮子を用い，水位および流速の測定は10分間隔で行った．用いた浮子は**写真-2**に示した表面浮子と吃水浮子(30cm)の2種類である．夜間時の測定では，発光素材(ルミカライト)を用いて行った．また，測定に用いた浮子を回収可能であった場合は，次の測定に再度用いた．

流速計測区間は直線区間が確保できる30m，助走距離は約15mとして左岸側から浮子を投下し，測定区間を流れる時間をストップウォッチにより計測した．本観測では，低水路幅が約4mと狭小であることから，測線は河川中央のみの1測線とし，各測定で表面浮子と吃水浮子をそれぞれ1つずつ投下した．投下の際には，表面浮子と吃水浮子が混同したり，衝突したりしないように数秒間の時間差を設けて投下した．観測時の様子を**写真-3**に示す．

なお，本観測では当初，浮子による流速測定に加え，TRDI社製のドップラー流速計V-ADCP(2400kHz)を用いた流速測定を予定していたが，河床材料が主に砂地であったため，センサーが流されないように出水前に河床に固定することが困難であった．したがって本観測ではドップラー流速計による測定は断念し，浮子による測定のみを行った．ドップラー流速計による流速測定は，高精度で詳細に測定可能であるが，二級河川のような小規模河川では洪水流出の降雨に対する応答が早く，台風上陸時等の集中観測では，観測準備に時間と手間が掛かることが課題となった．

(2)　流量観測結果

観測時の水位および流速の測定結果を**図-7**，**図-8**に示す．雨量はAMeDASの船橋地点の値である．更正係数は表面浮子を0.85，吃水浮子を0.88として平均流速を算出した[5]．水位のピークは，降雨の2つ目のピーク時である5時に来ているが，流速のピークは降雨の3つ目のピーク

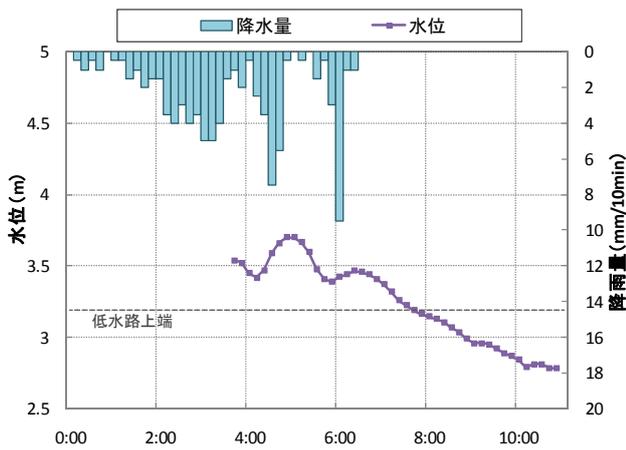



図-7　水位の観測結果

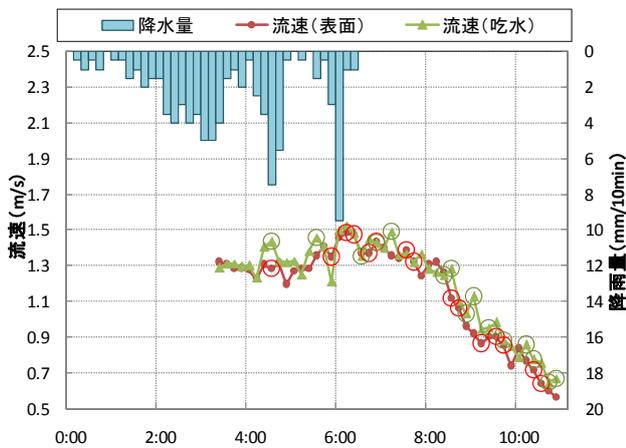



図-8　流速の観測結果

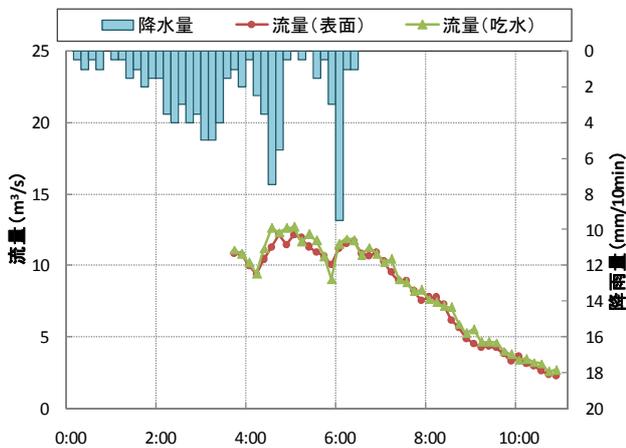



図-9　観測流量の比較

である6時10分に来ている．本観測中の水深は約1mから2mの範囲であったため，浮子選定の適用範囲としては吃水型が該当している[5]．観測結果では，表面浮子と吃水浮子の流速はほぼ同じ値をとっているが，吃水浮子の方がややばらつきが大きくなっていることがわかる．これは，海老川流域は横幅約4mの小河川であり護岸の影響等により横断方向の流れが影響していることが考えられる．なお，**図-8**において丸で囲まれたプロットは再利用した

表-2　各観測データから決定されたa, bの値

	使用したデータ	a	b
表面浮子	全データ	4.603	-1.952
	高水敷のみ	1.052	-0.288
	低水路のみ	10.200	-2.286
吃水浮子	全データ	4.437	-1.902
	高水敷のみ	1.488	-0.760
	低水路のみ	9.144	-2.224

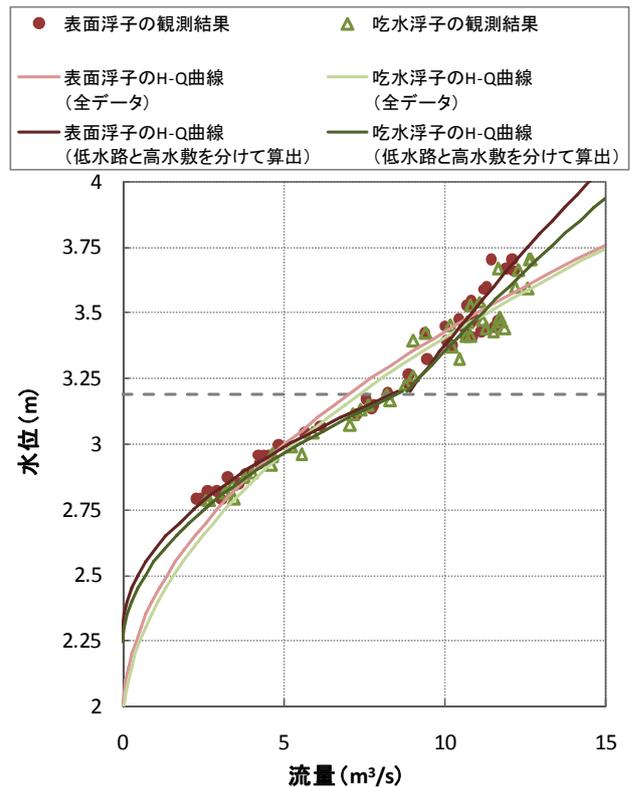



図-10　観測結果から作成した水位流量曲線

浮子による測定結果であるが，浮子の再利用による大きな測定誤差は見受けられなかった．

図-9は観測結果から得た流量の時系列である．表面浮子と吃水浮子の流量値はほとんど同じ値をとっているが，4時30分から5時までのピーク付近では，吃水浮子による測定の方がやや大きな値となっている．また，降雨終了後の8時頃に流量が増加している．これは，海老川の横断面形状が高水敷斜面に植生を有した複断面であり，断面特性が標高3.19mの上部である高水敷と下部である低水路で大きく異なっていることが影響していると考えられる．つまり，この時間帯に水面が高水敷から低水路内に低下し，表面流速が増加することで，算出流量が増加したものと考えられる．

また，降雨と流量のピーク時間の差は約10分であった．流域面積が約8.25km²の八栄橋地点における洪水到達時

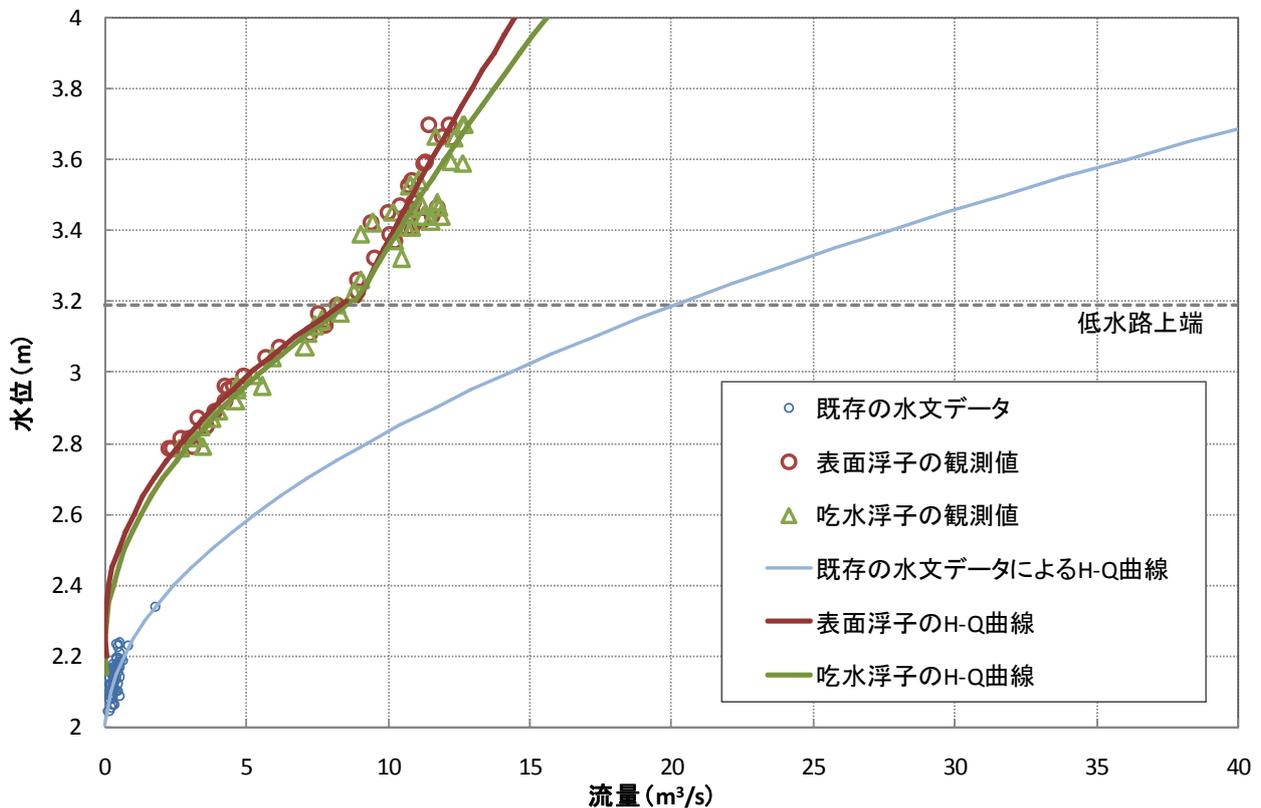



図-11　観測結果と既存の水文データから作成した水位流量曲線の比較

間としては非常に短い．つまり，降雨に対する流量の応答が早く．河川水位が急激に増水する都市小流域特有の流出特性を有している．

(3)　水位流量曲線の作成

表面浮子と吃水浮子のそれぞれの観測結果から水位流量曲線を作成した．水位流量曲線の作成に当たっては，式(1)の2次曲線式の定数算定を最小自乗法の適用により行った．

$$Q = a(H + b)^2 \qquad (1)$$

なお，八栄橋地点の横断面は標高3.19mが低水路と高水敷の境界であり，断面特性変化点であるため，各浮子の観測結果に対して全データを用いて算出したH-Q曲線，断面特性変化点を境界にして低水路と高水敷のそれぞれのデータを用いて算出したH-Q曲線を作成した．

求めた定数a, bは**表-2**に示した通りである．**図-10**は各観測結果から作成した水位流量曲線である．表面浮子と吃水浮子の結果を比較すると，わずかではあるが，表面浮子より吃水浮子の方が常に流量が多くなっている．

特筆すべきは，全観測データを用いて作成した水位流量曲線と低水路と高水敷を分けて作成した水位流量曲線を比較すると，最大で2m³/s以上の差が生じていることである．観測結果の分布からも低水路と高水敷の境界で分布特性が異なっていることが確認できるように，断面特性を無視した水位流量曲線の作成では，洪水流量を忠実に再現することは困難である．

4．流量観測結果と既存水文データの比較

海老川流域では，雨量と水位の継続的な水文観測の他に不定期な流量観測が2003年から2008年まで実施されている．ただし，この流量観測は平水時に実施されており，出水時のデータ取得までには至っていない．したがって本観測結果との単純な比較はできないが，この流量観測の結果からも水位流量曲線は作成されており，河川計画上の参考資料としては扱われている．**図-11**は本観測結果から作成した水位流量曲線とこれまでの平水時の流量観測から作成した水位流量曲線の比較である．既存の観測結果から作成された水位流量曲線の定数は，a=13.676, b=-1.977である．既存の観測結果は平水時のみのデータであるため出水時のデータが十分でなく，その水位流量曲線は洪水時の流量が本観測結果の約3倍程度になっている．このことから，既存の流量観測結果から作成された水位流量曲線を用いると，出水時の流量は非常に大きく算出することになり，適切な河川計画・管理は困難になる．

都市流域とはいえ二級河川のような小規模河川では，このように出水時の観測データが十分ではなく，そのような状況下で河川計画・管理に取り組まなければならないのが実情である．これは海老川流域に限ったことではなく，多くの小規模河川の管理に際して共通した現状であるが，平水時のデータから洪水流量を算出することは，

図-11に示したように大きく実測値と異なる値となることは留意しなければならない.

５．おわりに

本研究では，千葉県船橋市の海老川流域を対象に洪水時に浮子を用いた流量観測を行い，水位流量関係式の作成を行った．その際に，観測時の浮子の使用等に関する測定精度や複断面における水位流量関係の算出について検証した．さらに，実際に河川管理上用いられている水文観測データと著者らが行った出水時観測のデータを比較し，各データから算出される水位流量関係や流出特性を比較検証した．以上の結果から，得られた知見を以下に整理する.

1) 洪水時の浮子による流速測定結果では，表面浮子と吃水浮子を用いて実施したが，測定値に顕著な違いは見られなかった.
2) 海老川のような明確な複断面河川では，低水路と高水敷を分けて水位流量曲線を作成する必要がある．全データを用いた水位流量曲線と比較すると最大で2m^3/s以上の差が生じている.
3) これまでに海老川で実施された流量観測は平水時のみであるが，この結果により作成した水位流量曲線から洪水流量を算出すると，本観測より約3倍程度大きな値となる.
4) 洪水実測データの不足は多くの二級河川のような小規模河川が計画・管理上抱える課題である．しかしながら平水時のデータから洪水流量を算出すると実際の流量とは大きく異なることは，河川計画・管理の際に十分留意しなければならない.

謝辞：本論文における雨量，水位，流量に観測データは千葉県葛南地域整備センターより提供して頂きました．また船橋市の浸水実績は船橋市より提供していただきました．ここに記して謝意を示します.

参考文献

1) 海老川流域水循環再生構想検討協議会：海老川流域水循環再生構想―みんなで取り戻そう私たちの海老川―，1998年3月.
2) 海老川流域水循環再生推進協議会：海老川流域水循環系再生行動計画―みんなで取り戻そう私たちの海老川―，1999年12月.
3) 海老川流域水循環再生推進協議会：海老川流域水循環系再生第二次行動計画―みんなで取り戻そう私たちの海老川―，2006年3月.
4) Yangwen JIA, Guangheng NI, Yoshihisa KAWAHARA and Tadashi SUETSUGI: Simulation of hydrological cycle in an urbanized watershed and effect evaluation of infiltration facilities with WEP model, *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol. 19, No.1, pp.43-52, 2001
5) 建設省水文研究会：水文観測，社団法人全日本建設技術協会，1996年11月.

(2010. 7. 20受付)

初めて流量観測を行うにあたっての注意点 ～私的経験の備忘録～

ATTENTION POINTS FOR CARRYING OUT DISCHARGE OBSERVATION FOR THE FIRST TIME -MEMORANDUM OF PERSONAL EXPERIENCE-

加藤拓磨[1]

Takuma KATO

[1]正会員 博(工) 中央大学理工学部都市環境学科（〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27）

The present paper was written for the person who carry out discharge observation for the first time have many distresses for thinking over observation methods and from lack of experience. I describe the problems that have been encountered in trying to design observation, carry out it, purchase observation equipments, and take safety measures from beginner's viewpoint.

Key Words *: Discharge Observation Method, Observation Equipment, Safety Measure*

１．はじめに

新たな流量観測技術が多く開発され，例えばプライス式流速計では計測ポイントが一点だったのに対し，ADCP では一瞬にして河川流速断面データの計測が可能となり，時空間的に詳細なデータの取得が可能となった．しかし断面データが計測可能な高精度の機器は費用が高く，大型であるため，設置許可や多くの人員が必要であるなど条件によっては使用ができず，決して万能ではない．観測計画を立案するとき当初は観測地点を多くし空間的に広域，短時間観測インターバルとしたデータの取得を目標にし，欲張りになるが，観測機材の値段・精度・観測インターバル・電源の確保等様々なスペック, 観測手法, 観測地点の環境など様々な制約条件をしっかりと見定めた上で観測計画を立てる必要がある．観測目標と実現可能な観測体制を照らし合わせ，熟慮することが研究のオリジナリティーであり，研究の醍醐味の一つである．本稿では様々ある観測方法を大別し，観測目的・手法の考え方，流量観測準備とそれらに伴う問題点，留意すべき点を通常，論文などには記載されることのない筆者が経験・拝聴した失敗談を含め，観測をこれから行う初心者の観点からとりまとめた．

２．観測手法の特徴

水位・流量観測機器はその水の挙動を計測する困難さを表すように数多く存在し，またそのスペックに応じた研究・観測アイディアが無数生まれる．そこで，ここではそれら観測手法を大きく，(1)定点観測，(2)集中観測，(3)移動観測の３つに定義し，考え方をシンプルにまとめる(**図-1** はイメージ図)．各種観測機器の使用方法は他書[1), 2)]を参照されたい．

(1) 定点観測

ここで水位観測所と同様に河道内に観測機材を固定し，テレメータもしくは適時のデータ回収による自動観測方法を定点観測と定義する．

[利点]　定点観測は長期観測に適しており, 長いスパンの観測データは定量的な評価をするのに最も一般的で確実な観測方法である．観測には設置・撤収・適時点検作業のみの観測作業員がいればよい．

[欠点]　定点観測は観測機材を河道内に固定するための設置許可が必要となる．流量・流速の計測においては水位が時々刻々変化し，ある高度 1 点に固定した流速計では対応できないため, 高価である電波流速計[3)], 超音波式流速計[4)]，H-ADCP[5)]が必要となる．

[観測機器]　フロート式水位計，気泡式水位計，リードスイッチ式水位計，水圧式水位計，水晶式水位計，超音波式水位計，電波流速計，超音波流速計，H-ADCP，各種水質計など

(2) 集中観測

ここで河川事務所等が行う高水流量観測[1]のように洪水時に観測期間を絞り，観測作業員が同じ場所で計測し続ける観測を集中観測と定義する．一般的に水位は定点観測でデータ取得できるが，流量・流速観測は流況により大きく変動するため，表面流速を測る浮子，鉛直流速を測るプライス式流速計等を用いる観測作業員が必要な観測を行う．ADCPを曳航させる観測もこれに含める[6]．

[利点]　観測機材を固定設置しないため定点観測よりは容易に許可が得られ，事前に申請さえすれば，突如の降雨などによる緊急的な観測が必要なときに，この方法が有効である．

[欠点]　観測作業員が現場に張り付く必要があり，洪水時をターゲットにすると常に観測が実施できる準備体制を取る必要がある．

[観測機器]　量水標，量水板，浮子，光波測距儀による流量観測，ADCP，超音波流速計，水圧式水深流速計，ピトー管，プライス式流速計，三映式流速計，可搬型電磁流速計，ロープ式水位計，各種水質計，水質検査サンプル採取など

(3) 移動観測

ここで集中観測では観測作業員がひとつの現場に張り付くのに対して，観測作業員が複数ある現場に観測機器を運搬・観測し続ける方法を移動観測と定義する[7]．

[利点]　観測機器の個数，人員が少ないが観測地点を多くしたい場合には観測機器を複数個所へ運搬することで空間分解能を詳細にすることができる．機器が高価で1台しか所有できない場合などに有効である．集中観測と許可を取る難易度は同様で，緊急的な観測に有効である．

[欠点]　移動・運搬にかかる体力の消耗，移動費用を考慮すると長時間の観測には向かない．全地点で同時刻のデータを取得することは不可能である．

[観測機器]　量水標，量水板，浮子，光波測距儀による流量観測，ADCP，水圧式水深流速計，ピトー管，プライス式流速計，三映式流速計，可搬型電磁流速計，ロープ式水位計，各種水質計，水質検査サンプル採取など

(4) 観測手法の比較

観測目的の観測方法を思案する際，重要であるのは(ⅰ)観測地点数(空間分解能)，(ⅱ)観測インターバル(時間分解能)，(ⅲ)観測期間(定量的評価)の3点である．しかし限られた物的・人的資源では(ⅰ)と(ⅱ)は相反するもので，(ⅲ)に関しては人的資源もしくは観測機材の設置許可による．研究目的に向かって総合的に判断し，現実的に実行可能なレベルに落とし込む作業が必要である．筆者の経験から総合的にそれぞれの観測手法について鑑み，まとめたのが**表-1**である．必ずしもすべてに当てはまるわけではないが得たい観測データ，観測に伴う準備，観測が可能な期間を照らし合わせて観

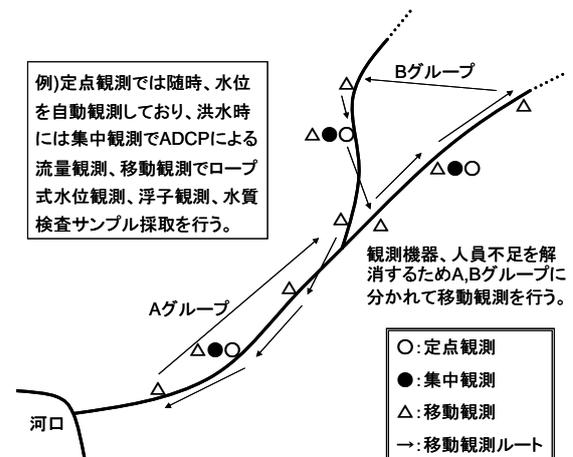



図-1　定点・集中・移動観測のイメージ

表-1　各観測手法の取得データ・準備のしやすさ・観測期間の比較

観測手法	取得観測データ		観測準備		観測期間		
	時間分解能（定量観測への適応）	空間分解能（広域観測への適応）	観測人員数（管理上、少数がよい）	実施許可（書面作成など）	長期（7日間以上）	中期（3～7日間）	短期（2日間以内）
定点観測（常時、機材を固定し、人員不要）	◎（高い）	△（疎）	◎（設置状況により現場にいる必要はない）	△（観測設置の許可書が必要、不受諾あり）	◎（データ回収・点検のみ）	△（設置可能ならば長期の観測が望ましい。）	△（許可・設置時間に対して不効率）
集中観測（常時、人員が必要）	◎（消耗品の数による）	△（疎）	○（多人数必要だが体力温存できる）	◎（定点観測よりも許可が容易）	×（人員不足）	○（固定観測不可の時、マンパワーで解消）	◎（観測意図そのもの）
移動観測（常時、移動する人員が必要）	△（低い）	◎（密）	△（時間分解能を維持するために多数必要）	◎（定点観測よりも許可が容易）	×（人員不足）	△（体力的に人員不足のため現実的に厳しい）	◎（機材不足解消）

※様々な観測手法を大きく三つの手法に分類し、比較した。現場、機材、人員により評価は変わる。

測方法を決定する．

3．観測目的・地点の設定

(1) 観測目的の設定

水文分野において，河川流量の定量的な把握は水資源管理上，最重要項目のひとつであり，それを目的とした研究の達成のために行う研究手法を大分類すると観測，実験，数値計算の３つとなる．河川流況は複雑なメカニズムの解析，実験・数値計算に反映のため観測による取得データは研究に欠かすことのできない根幹で唯一無二のものである．研究全体の目的をしっかりと見据えた上で観測対象河川を選定する．

(2) 観測地点の設定

流量観測対象河川が定まるとまず確認するのは国土交通省・自治体等が所有するテレメトリシステムの配置とその計測データであろう．ホームページ（例えば，川の防災情報 [8]）からリアルタイムに得られるデータは10分間隔の水位データであり，流速・流量データの算出には多くの作業を伴うためにリアルタイムのものはない [1), 2)]．大学，研究機関等が流量観測を行う根本の理由は，研究目的に対して防災を目的とした国土交通省，各自治体が所有するテレメトリシステムでは時空間的にデータが不足していることが挙げられ，対象河川流況を定量・定性的に分析するにあたり，その不足分を流量観測で補う観測計画を立てることになる．

観測計画が決定したのであれば観測対象河川内で観測地点を選定する．観測対象河川を踏査し，観測目的にあった場所を選定する際には観測機材設置・作業可能なスペースがあるか，観測用の電源が確保できるか（もちろん，なくともよい），許可が必要であるのかを見定めなければならない．

また研究目的・計測対象によってはそこで得られるデータがその観測対象河川・観測地点の特性を踏まえた代表性を有しているかを精査する必要があり，状況により代表性を担保しているかを確証する観測が必要にもなる．河川流況は非定常現象であるが研究方針によっては計測している瞬間のデータは定常状態であると仮定する．このことを踏まえ，例として都市河川断面内で流速の計測ポイントの選定を考えると**図-2** に示すように様々な障害より河川流況は乱流構造を持つために，渦，逆流，剥離，死水などにより定常状態とみなせない観測ポイントを多数含むことになる．大河川を例にすれば，大規模水平渦の振動・周期を踏まえた計測になっているのかを検討する．河川断面の中でどのポイントが妥当か，もしくはその河川断面が観測するには不適格であるかを少なくとも目視や簡易な観測で確認しなければならない．初期の観測では澪筋で計

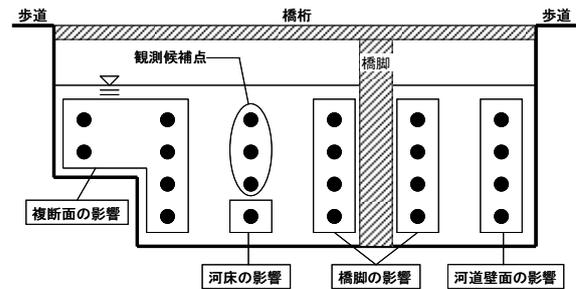



図-2 観測をする際に考慮すべき点

測するのが基本となるだろう。観測を実施するもそれが澪筋を見つけるための事前調査レベルで終わり，再観測が必要になることもある．もちろん，このような水理現象の解明を観測目的している場合は敢えてこのような地点を選ぶこともありうる．河道外で観測地点として重視するのは河川を縦断・横断するのに適した歩道・橋梁があるか，観測地点付近に道具の不備があったときのためのホームセンターがあるかを調べるとよい．

(3) 観測計画書の作成

上記を鑑みて，観測目的，観測地点(地図含む)とその妥当性，観測期間とそのための全体スケジュール，流量観測手法，観測機器設置・撤去工程とそれに必要な環境調査，使用機器・道具のリスト，安全管理などの情報を記載する．特に安全面に関しては熟慮する．観測計画書の作成は観測の基本であり，ここの段階で怠ると経験上必ずといっていいほど観測とその準備でミスが生じる．工程が進むにつれて状況が変化するために常に更新していく必要がある．

4．観測機器の購入

大学機関では学生の教育のために機材の購入担当者(責任者でなく)を学生にすることがある．学生が自身のPC，家電などの購入にかける情報収集能力は高いものであるが，こと研究費で購入となるとその能力は著しく低下する．流量観測をするにあたり必要な情報を理解し切れていない点も否めないが，自身の買い物をするように厳密な情報を収集するように要求する．いずれにせよ誰が購入担当者になろうが情報としては以下の観測機器とそれに付随する内容を調べる必要がある．

(1) 観測原理・精度

原理と精度を確認し，対象観測地点に適合したものを選ぶ．データ分解能と時定数(センサーのタイムログ)

がわからなければ使用方法を誤る可能性さえあり，深い理解が求められる．単純な原理の機器であれば，現場で修理することも可能なこともある．精度の保障のために検定済みの機器が望ましいが費用が高騰することを検討する．

(2) 観測機器の構造

観測センサー，ロガー，モニターが一体型・分離型のどちらであるか．また分離型で有線の場合，ケーブルの長さ・延長が可能であるか，無線の場合，その通信距離がどのくらいであるか．PC をモニターとして使用する機器もある．観測手法に合わせて，これらの構造から選択する．例えば 20m のケーブルであれば観測できたところ 10m しかないために計測できない事例があった．

(3) 観測機器のサイズ

集中・移動観測では持ち運びやすさが重要視されるためコンパクトで軽量がよい．観測機器の構造も考慮し，観測手法に最適なサイズのものを選択する．

(4) 設置しやすさ

定点観測ならばボルトや針金などで固定可能か，集中・移動観測ならばロープなどに吊るすことが可能か，その観測手法に応じ，安全かつ効率的に使用できる形状を選ぶ．

(5) 電源の種類

観測機器に電源が必要な場合，それが電池，バッテリー，AC100V いずれであるのか．バッテリーであった場合，それが製品の付属オプションであるのか．また新品電池・フル充電された状態から最長の計測時間がいくらかを知る必要がある．場合によってはロガーの最大データ記録に満ちる前に電源が落ちる可能性もある．

(6) データの記録方法

自動記録であれば，最小観測インターバルタイムと最多記録数を知る必要がある．モニター画面上で最小インターバルに設定するもののメモリへの書き込み速度が足りずに予定通りのデータが記録されないこともある．集中・移動観測に使用するのであれば，観測データは自動記録である必要はなく，目視でモニターの値を記録することで十分にその機能を補える．

(7) 防水加工

センサーはもちろん耐水性が高いが，ロガー，モニターは防水加工が施されていないことがほとんどである．どの現場においても水に触れるためにできれば欲しい機能である．特に長期定点観測を行うのであれば，必要不可欠である．

(8) 観測機器の試用

販売店から機器を試用させてもらえるのであればプレ観測を行った方がよい．費用と観測に必要なスペックの比較検討，使用方法の確認をする必要がある．無駄な購入，本番での失敗を避けるためにできるだけ行いたいものである．

(9) 納品までの時間

観測実施予定日が直近で急ぎの準備である場合に想定しなければならない．ある商品を取り扱っている販売店は多々存在するがそれらは販売代理店のみとしての役割で，メーカーは 1 社である．メーカーが直接販売，代理店経由販売の両方がある．在庫確認をしようもその販売店に必ずあるわけではなく，メーカーの在庫量に依存するため，その確認だけで時間がかかることがある．またその商品が外国製のもので在庫がないとなれば輸送する時間も考慮しなければならない．海外メーカーは時間にルーズであることが多く，そのときは今後の全くスケジュールの見通しが難しくなる．ほかに研究機関の会計担当，業者間の手続きの流れとすべてを踏まえた合計時間を鑑みて，観測開始日を決定することとなる．

(10) 観測機器販売店

前述のように販売店によっては販売代理業務のみしかできない業者もあり，同じ商品でも販売店によって値段からサービスまでが異なる．販売店が観測機器について理解していない場合があり，機材が届くも観測に必要なパーツが足りない場合がある．よくあるケースとしてはケーブルが足りない．それは発注ミスであるがケーブルがないと使用できないということ事実を業者が理解していないために起こる事故である．ウェブ・メール発注のみではなく電話や直の交渉で相手側の機器に対する理解を確認する．

(11) 販売店のアフターサービス

販売店によっては購入後であっても観測に付き添い，機器の使用方法の詳細な説明，観測環境に応じた技術提案などをしてくれるところもあり，きめ細かいサービスをしてくる販売店を見つけることを勧める．

(12) 購入費用

研究目的，観測対象河川・地点の環境，メーカーの対応を総合的に踏まえて妥当な購入費用であるかを検討する．

５．観測直前準備

観測するにあたり観測実施計画書の作成，観測対象河川の管轄部署への許可，観測機器・道具の準備，観測知識・健康を備えた人員の参集などが必要となってくる．観測に到るまでの最低限必要な準備概要を以下に示す．集中・移動観測に重きを置いた記述をしている．

⑴ 観測の許可

定点観測で河道内に機器を設置する際には河川占有許可書等を河川事務所・自治体所管部署に提出する必要がある．集中・移動観測はもの珍しい光景であるために通行者に話しかけられることがよくある．事前に近隣の警察署・交番，場合によっては住民の代表者に説明しに行くことで観測作業中，通行者に話しかけられること，作業内容が怪しいと疑われることも減り，作業効率を落とすこともなくなる．

⑵ 観測実施計画書の作成

３．⑶で作成した観測計画書にスケジュール，作業工程，機器・道具のリストと使用方法，緊急連絡先(警察署・消防署・病院)などを追記する．それを見るだけで観測人員が行動できるよう詳細に記載する必要がある．観測実施計画書は随時更新するものであるためにその作業と連動させる．

⑶ 観測人員の研修

初めて観測を担当するものには安全面を重点的に観測計画書の内容を詳細まで理解してもらう．例えば，観測機器の使用方法がわからないと機器の蓋を開けるべきところを開けずに観測し続け，欠測をした失敗例がある．逆に観測目標から全体までの理解があれば，水位計が使用不可能になる非常事態になったとき，水位計の代わりにデジカメで水位変化を捉えることでリカバリーした事例もある．ロープワーク(もやい結び)や針金を使った固定方法を習得することが好ましい．

⑷ 観測機器の点検

観測機器・道具を事前にテストランし，使用が問題なくできるかを確認する．その段階で破損がないか，オプションパーツがすべて揃っているのかを見る．初心者がよくするミスとしてバッテリーの未充電，時刻調整していないことが挙げられる．時刻調整に関しては観測機器だけではなく，観測関係者全員の時計を時報・電波時計・インターネット時計に合わせる．機器の詳細な設定を観測現場で行おうとすると，現場では雨風に晒されるために作業効率は著しく低下し観測スタートが遅れる．また PC に観測機器のアプリケーションをインストールしていない，RS-232C ケーブルと RGB ケーブルを勘違いするなど重大なミスが起こるのを防ぐ．

⑸ 観測道具の準備

主に観測方法により不要のものもあるが使用することが多いものを以下に列挙する．現場に行くに相応しい格好が必要である．胴長(ゴム製のオーバーオールと長靴が一体化したもの)を着て河川に飲み込まれた際に長靴部分にだけ空気が残り，逆さまの状態になり，亡くなられた事例があるために使用すべきではない．安全と効率を兼ね備えた観測道具を準備する．

[個人装備品] ヘルメット，ライフジャケット，レインコート，長靴，タオル，時計，軍手(ゴム手袋)，所属機関がわかるもの(腕章・ベスト・ビブス)，防水の貴重品袋(ジップロックがお勧め)，着替え，観測概要を示したビラ

[全体] 観測機器(観測内容による)，工具箱(ドライバー，カッター，ハサミ，ビニールテープ，針金，予備の電池)，メジャー，複数の長さのロープ，カルビナ，錘(ロープを張らせるため)，野帳，各種チェックリスト，デジカメ，ノート PC，無線機，車用 AC コンバータ(非常時の充電用)，発電機，バッテリー簡易テント，椅子

６．観測現場

現場で観測以外に行わなければならないこと，起こるリスクがあるものを箇条書きする．

- 現場に到着し，観測計画通りに体制を整える最中，論文・発表を意識し，その観測風景を写真に収める．
- ライフジャケット，ヘルメットは観測中必ず装備しなければならず，その様子も写真に収める．
- 一番多い怪我はロープを使う観測で，手袋をしなければ指を落としかねない大事故を引き起こす可能性がある．
- 観測初心者であると緊張感と羞恥心で最初，動きがぎこちなく，集中力に欠けるため，現場責任者は注意を払う．
- 通行者が話しかけてくることは多々あるので人当たりよく，中学生でも理解できるわかりやすい説明が求められる．説明する暇がない観測方法であればビラを用意するのもよい．
- 橋梁の歩道が狭い場合，通行人にとって邪魔にならないように荷物をコンパクトにまとめるとともに，現場での整理整頓に努める．
- 安全を特に最優先し，リスクが伴うような状況下においては観測を即中止にする決断力も必要となる．

７．まとめ

流量観測のみではなく観測全般に言えることであるが観測は諸自然現象解明のための根幹となるデータを収集するものであり，各分野の発展のために必要不可欠な技術である．研究目的達成のためには安全性，手法論，費用，関係者への配慮など様々な問題，懸案事項が生じる．未知な現象に飛び込むために未知のトラブルが付き物である．現場では安全に最大限配慮し，情熱を持って有益なデータを収集する．本稿が流量観測策定の一助になり，観測が成功することを願う．

参考文献

1）独立行政法人土木研究所，水文観測(第４回改訂版)，平成14年９月．

2）四国地方整備局河川部　四国水文観測検討会：第 1 版水文観測の用語集，平成15 年3 月．

3）山口高志，新里邦生他：電波流速計による洪水流量観測，土木学会論文集，No.497,Ⅱ-28，1994.

4）中川一，小野正人，小田将広，西島真也：横断平均流速の測定と流速分布の数値シミュレーションを組み合わせた流量測定技術の開発と大河川での実地検証，水工学論文集，Vol.50, pp.709-714，2006.

5）二瓶泰雄，木水啓：H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築，土木学会論文集B，Vol.63，No.4，pp.295-310，2007.

6）岡田将治，橘田隆史，森本精朗，増田稔：ADCP搭載無人ボートを用いた四万十川具同地点における洪水流観測，水工学論文集，Vol.52，pp.919-924，2008.

7）川村理史，呉修一，加藤拓磨，山田正：都市河川感潮域における水質の空間分布特性および出水時の溶存酸素濃度変化に関する現地観測，平成20年度土木学会全国大会第63回年次学術講演会，Ⅱ-095，2008.

8）川の防災情報：http://www.river.go.jp/

（2010.7.20受付）

水文・水資源学会 研究グループ

「河川流量観測高精度化研究会」

岡田将治	高知工業高等専門学校 環境都市デザイン工学科
加藤拓磨	国土技術政策総合研究所 河川研究部 水資源研究室
◎手計太一	富山県立大学 工学部 環境工学科
宮本守	㈱土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）
安田浩保	新潟大学 災害復興科学センター
萬矢敦啓	㈱土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター（ICHARM）

◎代表